

# Untersuchung von infrastrukturellen Maßnahmen für den energieeffizienten Bahnbetrieb

Masterarbeit für die Prüfung zum Master of Science im Studiengang

*Planung und Betrieb im Verkehrswesen*

an der Technischen Universität Berlin

Berlin, 18. August 2015

Name:	Thomas Krause	Ulrich Zimmermann
Matrikelnummer:	32 63 73	32 64 40
eMailadresse:	thomaskrause1983@me.com	ulrich.c.zimmermann@gmail.com

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Siegmann

Zweitgutachter: Philipp Schneider, M.Sc.

Mit freundlicher Unterstützung von:

Dipl.-Ing. Tilo Schumann | Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrttechnik e.V.

Dipl.-Ing. Michael Rittner | DB Netz AG

Dipl.-Ing. Jens Mersiovsky | Deutsche Bahn AG

# Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe bzw. ohne Benutzung anderer, als den angegebenen Hilfsmitteln angefertigt habe.

Ich habe keine anderen, als die angegebenen Quellen verwendet und aus den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit wurde bisher keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht. Ich bin mir bewusst, dass eine unwahre Erklärung rechtliche Folgen haben wird.



---

Thomas Krause

Berlin, 18. August 2015



---

Ulrich Zimmermann

Berlin, 18. August 2015



# Aufgabenstellung

Das Ziel dieser studentischen Arbeit ist es, eine Übersicht über mögliche infrastrukturseitige Ansätze für einen energieeffizienten Eisenbahnbetrieb zu erstellen und eine Bewertung der Ansätze durchzuführen.

Zunächst ist deduktiv herzuleiten, an welchen Stellen infrastrukturseitige Energieeffizienzuntersuchungen sinnvoll ansetzen können. Aus Praxis und Wissenschaft sind Ansätze für einen energieeffizienteren Betrieb zu recherchieren und der Lösungsraum (Infrastruktur, Technik und Betrieb) zu strukturieren. Grundlage hierfür ist eine Identifikation von Situationen im Bahnbetrieb, die sich negativ auf den Energieverbrauch auswirken. Im weiteren Verlauf der Arbeit soll der Fokus auf Ansätzen liegen, bei denen mit infrastrukturellen Maßnahmen eine verbesserte Energiebilanz erreicht werden kann. Dazu gehören u.a. die Ermittlung der technischen Umsetzbarkeit, der Kosten (LCC), der Bauzeit und zusätzlich der Wirksamkeit mit Hauptfokus auf die Energieeinsparung für die einzelnen Maßnahmen. Falls möglich, findet eine Weiterentwicklung bzw. Neuentwicklung von Maßnahmen statt. Die einzelnen Maßnahmen sollen nach selbst zu definierenden Kriterien kategorisiert werden, um eine Übertragung der Maßnahme auf Engpässe mit ähnlichen Randbedingungen zu ermöglichen und eine Aussage über netzweite Energieeinsparpotentiale zu treffen.

Die anschließende Bewertung der Maßnahmen muss neben dem Energieeinsparpotential die Aspekte der Pünktlichkeit und der Streckenkapazität sowie wirtschaftliche Gesichtspunkte einbeziehen.

Die Arbeit soll geeignete Ansätze an einem Fallbeispiel demonstrieren. Die Auswahl der Streckenabschnitte wird im Rahmen der Recherchen durchgeführt. Optional wird auch eine bereits realisierte Maßnahme *ex post* ausgewertet. Anschließend findet die Berechnung der Energieeinsparung für jedes Fallbeispiel statt. Dazu wird abschließend eine Gegenüberstellung von Energieeinsparung und Kosten der Maßnahme vorgenommen und bewertet.

Die Erkenntnisse sind in einem umfassenden Bericht, einer zusammenfassenden Textdatei und in einem Präsentationsposter darzustellen. Darüber hinaus sind die Ergebnisse der Arbeit im Rahmen einer Vortragsveranstaltung des Fachgebiets zu präsentieren.

Der Bericht soll in gedruckter Form als gebundenes Dokument sowie in elektronischer Form als ungeschütztes PDF-Dokument eingereicht werden. Methodik und Vorgehen bei der Arbeit sind explizit zu beschreiben und auf eine entsprechende Zitierweise ist zu achten. In dem Bericht ist hinter dem Deckblatt der originale Wortlaut der Aufgabenstellung der Arbeit einzuordnen. Weiterhin muss der Bericht eine einseitige Zusammenfassung der Arbeit enthalten. Diese Zusammenfassung der Arbeit ist zusätzlich noch einmal als eigene, unformatierte Textdatei einzureichen.

Sollten Teile der Arbeit aufgrund von Geheimhaltungsverpflichtungen einem Sperrvermerk unterliegen, ist neben der vollständigen mit einem Sperrvermerk versehenen Arbeit auch eine öffentliche Fassung für die Bibliothek des Fachgebietes abzugeben.

Das Präsentationsposter soll die Inhalte der Arbeit in geeigneter Art und Weise in anschaulicher Form repräsentieren. Geeignete Formatvorlagen für das Poster finden sich auf der Website des Fachgebiets.

Für die Bearbeitung der Aufgabenstellung sind die Hinweise zu beachten, die auf der Webseite mit der Adresse [www.railways.tu-berlin.de/?id=66923](http://www.railways.tu-berlin.de/?id=66923) gegeben werden.

Der Fortgang der Abarbeitung ist in engem Kontakt mit dem Betreuer regelmäßig abzustimmen. Hierzu zählen insbesondere mindestens alle vier Wochen kurze Statusberichte in mündlicher oder schriftlicher Form.

## Kurzfassung

Die Einsparung von Energie ist ein hochaktuelles Thema. Auch im Schienenverkehr existiert eine Vielzahl an Publikationen, die verschiedene betriebliche und fahrzeugseitige Optimierungen zur Senkung des Energiebedarfs behandeln. Zur Thematik der infrastrukturellen Optimierung existiert weniger Literatur.

Diese Masterarbeit widmet sich daher der Betrachtung infrastruktureller Maßnahmen zur Reduzierung des Energieverbrauchs im Schienenverkehr. Dazu wird vorab eine Herleitung zur Ermittlung spezifischer Energieverbräuche durchgeführt, bevor anschließend infrastrukturelle Engpässe definiert und analysiert werden. Darauf aufbauend werden infrastrukturelle Maßnahmen zusammengestellt, die der Behebung von betrieblichen Einschränkungen dienen. Anschließend wird ein Modell entwickelt, welches die Energieverbräuche aufgrund der betrieblichen Einschränkungen berechnet. Anhand mehrerer Fallbeispiele verschiedener Engpasskategorien, dazu gehören überlastete Strecken, Knoten, eingleisige Strecken und La-Stellen, werden die entwickelten Methoden angewandt.

Als Ergebnis dieser Arbeit werden Energiemehrverbräuche berechnet und die infrastrukturellen Maßnahmen implementiert. Es wird sich zeigen, dass eine Amortisation der aufzubringenden Kosten allein durch die Energieeinsparung nur in Einzelfällen gegeben ist. Besonders bei hohen Ausbaurkosten der Infrastruktur ist der Anteil, der als Nutzen durch Energieeinsparungen auftritt, gering. Die Auswertung beschränkt sich dabei auf den Aspekt der Energieverbräuche und deren Reduzierung.

Wortanzahl für den gesamten Text exklusive Anhang: 40.789 Wörter

## Danksagung

Als Erstes möchten wir uns bei Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Siegmann für die freundliche Übernahme des Erstgutachtens bedanken.

Ein besonderer Dank gilt unserem Betreuer Philipp Schneider, der uns mit großem Interesse an der Thematik unterstützte. Zudem war er für uns stets ansprechbar und ließ uns die Freiheit, die Arbeit nach unseren Vorstellungen zu entwickeln.

Eine wertvolle Unterstützung für uns war die hervorragende fachliche Betreuung von Herrn Tilo Schumann (DLR), Herrn Michael Rittner (DB Netz) sowie Herrn Jens Mersiovsky (DB). Mit großem Engagement hatten Sie stets ein offenes Ohr für unsere Fragen und halfen uns mit ihrer Expertise viele Male weiter.

Auch möchten wir unserem Kommilitonen Robert Benning einen großen Dank aussprechen. Neben der fachlichen Schlusskorrektur der Arbeit, beteiligte er sich bereits im frühen Entstehungsprozess mit nützlichen Eingaben und klugen Hinweisen.

Zudem gilt unser Dank den fleißigen Korrekturlesern Michaela Pelz, Michael und Wolfgang Zimmermann sowie Martin Schneider für ihre hilfreiche und sorgfältige Überprüfung der Arbeit.

Abschließend möchten wir unseren jeweiligen Eltern danken, für die großartige Unterstützung während unserer Studienzeit.

# Inhaltsverzeichnis<sup>1</sup>

<b>Aufgabenstellung.....</b>	<b>I</b>
<b>Kurzfassung.....</b>	<b>III</b>
<b>Danksagung.....</b>	<b>IV</b>
<b>Inhaltsverzeichnis.....</b>	<b>V</b>
<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>XI</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>XII</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>XIV</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
<b>2 Bahnenergietechnische Grundlagen .....</b>	<b>4</b>
2.1 Energieversorgung des Bahnsektors in Deutschland.....	4
2.1.1 Bahnenergieerzeugung.....	7
2.1.2 Bahnenergieübertragung.....	8
2.1.3 Bahnenergieverteilung.....	9
2.1.4 Bahnenergiezuführung.....	9
2.1.5 Bahnenergieabnahme.....	10
2.1.6 Bahnenergierückführung.....	11
2.1.7 Bahnenergierückgewinnung (Exkurs).....	11
2.2 Elektrische Verbraucher .....	12
2.2.1 Traktionsenergie .....	13
2.2.2 Stationäre Energie.....	14
<b>3 Energetische Herleitung .....</b>	<b>15</b>
3.1 Energiebedarf elektrischer Bahnen.....	16
3.1.1 Ausgangsgröße: Widerstände.....	16
3.1.1.1 Neigungswiderstand .....	18
3.1.1.2 Bogenwiderstand.....	19

---

<sup>1</sup> Die Aufteilung der Arbeit fand nach folgenden Kapiteln statt:  
Kapitel 1 | 2 | 3 | 4 | 6.1 | 6.2 | 6.4 | 8.1.1 | 8.1.2 | 8.4 → Thomas Krause  
Kapitel 5 | 6.3 | 7 | 8.1.3 | 8.2 | 8.3 | 8.5 | 8.6 | 9 → Ulrich Zimmermann

3.1.1.3	Fahrzeugwiderstand .....	19
3.1.1.4	Beschleunigungswiderstand.....	21
3.1.2	Ausgangsgröße: Zugkraft.....	23
3.1.3	Streckenbelastung und Transportarbeit.....	25
3.1.4	Energiebedarfsermittlung nach Kother .....	26
3.1.4.1	Spezifischer Energiebedarf für eine Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit ...	27
3.1.4.2	Spezifischer Energiebedarf für eine Fahrt mit Beschleunigung.....	28
3.1.4.3	Spezifischer Energiebedarf für Nebenverbraucher .....	30
3.1.4.4	Spezifischer Energiebedarf für Heizung und Klimatisierung .....	30
3.1.4.5	Spezifischer Energiebedarf ab Stromabnehmer .....	30
3.1.4.6	Spezifischer Energiebedarf ab Unterwerk.....	30
3.1.4.7	Absoluter Energiebedarf ab Unterwerk.....	31
3.2	Verifikation der Energiebedarfsberechnung nach Kother .....	32
3.2.1	Fahrzeugspezifische Parameter .....	33
3.2.1.1	Bruttogewicht.....	34
3.2.1.2	Beschleunigung.....	35
3.2.1.3	Beschleunigungsweg.....	37
3.2.1.4	Verzögerung.....	38
3.2.1.5	Verzögerungsweg.....	39
3.2.1.6	Fahrzeugwiderstand .....	39
3.2.2	Durchführung der Verifikation.....	42
3.2.2.1	Berechnungsmodell .....	42
3.2.2.2	Auswertung .....	43
3.3	Energetische Betrachtung des Beschleunigungsproblems .....	45
3.4	Zusammenfassung .....	47
<b>4</b>	<b>Betrachtung verschiedener Lösungsräume zur Reduzierung des</b>	
	<b>Energiebedarfs.....</b>	<b>48</b>
4.1	Lösungsraum: Betriebliche Optimierung.....	49
4.1.1	Planungsphase .....	49
4.1.2	Operativer Betrieb .....	50
4.2	Lösungsraum: Fahrzeugseitige Optimierung.....	53
4.2.1	Optimierung Wagen .....	54
4.2.2	Optimierung Triebfahrzeuge.....	55
4.3	Lösungsraum: Infrastrukturseitige Optimierung.....	56

<b>5 Engpassanalyse</b>	<b>58</b>
5.1 Einleitung und Begriffsdefinitionen	58
5.1.1 Kapazität und Leistungsfähigkeit	58
5.1.2 Abstraktion der Infrastruktur	60
5.2 Grundlagen der Engpassanalyse	62
5.2.1 Kantenengpässe	62
5.2.2 Knotenengpässe	63
5.2.3 Analyse der Quellen	64
5.2.4 Identifizierung der Engpässe	66
5.2.5 Engpasskategorien	68
<b>6 Maßnahmenkatalog Infrastrukturausbau</b>	<b>70</b>
6.1 Einzelmaßnahmen	71
6.1.1 Oberbau	72
6.1.2 Untergrund/Unterbau	73
6.1.3 Fahrleitung	73
6.1.4 Weichen	74
6.1.5 Sicherungstechnik	75
6.1.5.1 Bahnübergang beschränken	75
6.1.5.2 Signaltechnik	76
6.1.6 Brücken	77
6.1.7 Tunnel	78
6.1.8 Personenunterführung	79
6.1.8.1 Tunnelement	79
6.1.8.2 Treppenelement	80
6.1.8.3 Aufzug	80
6.1.9 Bahnhofselemente	81
6.2 Zusammenfassende Maßnahmen	81
6.2.1 Streckenelemente	82
6.2.1.1 Neubau- und Ausbaustrecke	82
6.2.1.2 Streckenknoten	84
6.2.1.3 Sonderfall: Verbindungskurve	85
6.2.2 Bahnhofselemente (zusammengefasst)	86
6.2.3 Kunstbauten	87
6.2.3.1 Brücke über Kleingewässer	87
6.2.3.2 Brücke über andere Schienenstrecken	87

6.2.3.3	Überwerfungsbauwerk für abzweigende Strecken .....	88
6.2.3.4	Straßenquerung.....	89
6.3	Zuordnung der Baumaßnahmen zu Engpasskategorien.....	89
6.3.1	Kantenengpässe .....	90
6.3.2	Knotenengpässe .....	91
6.3.3	La-Stellen .....	93
6.3.4	Eingleisige Strecken .....	93
6.4	Kritische Betrachtung und Zusammenfassung.....	94
<b>7</b>	<b>Modellierung der Engpässe .....</b>	<b>97</b>
7.1	Berücksichtigung von Neigung, Bogenradien und Elektrifizierung.....	97
7.2	Betriebsprogramm.....	98
7.2.1	Zweigleisige Hauptstrecke (sehr hoch belastet).....	100
7.2.2	Zweigleisige Hauptstrecke (hoch belastet).....	101
7.2.3	Zweigleisige Hauptstrecke (durchschnittlich belastet).....	102
7.2.4	Eingleisige Strecke (schwach belastet, nur SPNV).....	102
7.2.5	Eingleisige Strecke (SPNV mit zusätzlichem Güterverkehr) .....	103
7.2.6	Zuordnung der Betriebsprogramme zu den Engpassstellen.....	103
7.3	Modellierung der zweigleisigen Kanten .....	104
7.3.1	Grundlagen des Kantenmodells .....	105
7.3.2	Verfahrensweise .....	107
7.4	Modellierung der Knoten .....	108
7.4.1	Grundlagen des Knotenmodells .....	108
7.4.2	Modellierung mit OpenTrack .....	110
7.4.3	Infrastruktur der Abzweigstelle.....	110
7.4.4	Fahrplan .....	111
7.4.5	Verspätungswahrscheinlichkeiten .....	113
7.5	Modellierung der La-Stellen .....	114
7.6	Modellierung der eingleisigen Strecken .....	115
7.6.1	Grundlagen des Modells für eingleisige Strecken .....	115
7.6.2	Modellierung mit OpenTrack .....	116
7.6.3	Infrastruktur der eingleisigen Strecke .....	117
7.6.4	Fahrplan .....	117
7.6.5	Länge des Kreuzungsabschnittes .....	119



<b>8 Auswertung Energiebedarfe und Infrastrukturausbau .....</b>	<b>123</b>
8.1 Einführende Erläuterungen .....	123
8.1.1 Erläuterung der angepassten Berechnungsmethodik zur Ermittlung des Energiemehrbedarfs am Beispiel der La-Stellen .....	123
8.1.1.1 Berechnung des Energiemehrbedarfs aufgrund der Beschleunigung.....	125
8.1.1.2 Energieeinsparung durch reduzierte Geschwindigkeit .....	127
8.1.1.3 Energieeinsparung während des Bremsvorgangs .....	127
8.1.1.4 Energierückgewinnung.....	128
8.1.2 Energiepreisberechnung.....	128
8.1.3 Infrastrukturkosten.....	130
8.2 Engpasskategorie: Hochbelastete Kanten .....	131
8.2.1 Ergebnisberechnung Energieverbrauch .....	131
8.2.2 Implementierung der Maßnahmen .....	133
8.2.3 Beispielstrecke Wunstorf – Minden (Strecke 1700) .....	133
8.2.4 Einschätzung der Ergebnisse .....	135
8.3 Engpasskategorie: Hochbelastete Knoten .....	136
8.3.1 Auswertung der Simulation .....	136
8.3.2 Ergebnisberechnung Energieverbrauch .....	139
8.3.3 Implementierung der infrastrukturellen Maßnahmen.....	141
8.3.4 Einschätzung der Ergebnisse .....	142
8.4 Engpasskategorie: La-Stellen .....	143
8.4.1 Ergebnisberechnung.....	143
8.4.2 Implementierung der infrastrukturellen Maßnahmen.....	145
8.4.2.1 Mangelkategorie: Oberbaumangel .....	148
8.4.2.2 Mangelkategorie: Untergrundmangel.....	149
8.4.2.3 Mangelkategorie: LST-Mangel.....	150
8.4.2.4 Mangelkategorie: Brückenmangel.....	152
8.4.2.5 Mangelkategorie: eingeschränkte Sicht .....	153
8.4.2.6 Mangelkategorie: Reisendensicherung .....	154
8.4.2.7 Mangelkategorie: Schleppkurve.....	157
8.4.3 Zusammenfassende Bewertung der Engpasskategorie La-Stelle.....	159
8.4.3.1 Vergleich der Ausgaben zur Implementierung der infrastrukturellen Maßnahmen versus der Einnahmen durch den reduzierten Energiebedarf.....	160
8.4.3.2 Bewertung der Fahrzeitgewinne und Streckenkapazität.....	162
8.5 Engpasskategorie: Eingleisige Strecken .....	163

8.5.1	Ermittlung der Güterzughalte .....	164
8.5.2	Ergebnisberechnung Energieverbrauch .....	165
8.5.3	Implementierung der Maßnahmen .....	166
8.5.4	Beispiel Langwedel – Uelzen (Strecke 1960) .....	166
8.5.5	Einschätzung der Ergebnisse .....	168
8.6	Kritische Würdigung .....	169
8.6.1	Nutzenkomponenten .....	169
8.6.2	Infrastrukturfinanzierung .....	171
8.6.3	Bewertungsmodell .....	172
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>173</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>XV</b>
	<b>Anhangsverzeichnis .....</b>	<b>XXXIV</b>
	<b>Anhänge .....</b>	<b>XXXV</b>

# Abbildungsverzeichnis

<i>Abb. 1: Entwicklung des spezifischen Primärenergieverbrauchs bei der DB von 1990-2004.....</i>	<i>1</i>
<i>Abb. 2: Prinzipieller Aufbau der Bahnenergieversorgung in Deutschland.....</i>	<i>6</i>
<i>Abb. 3: Kreislauf der Bahnenergieversorgung .....</i>	<i>7</i>
<i>Abb. 4: Zusammensetzung der Bahnenergie in Deutschland im Jahr 2009 .....</i>	<i>8</i>
<i>Abb. 5: Verbrauch von Traktionsenergie und stationärer Energie im Jahr 2012 [in GWh].....</i>	<i>12</i>
<i>Abb. 6: Verlauf des Energieverbrauchs während einer Fahrt.....</i>	<i>15</i>
<i>Abb. 7: Verlauf der Leistungsgrenzen eines Schienenfahrzeugs .....</i>	<i>24</i>
<i>Abb. 8: Optimierte Zugreihung im Knoten und auf der Strecke .....</i>	<i>51</i>
<i>Abb. 9: Leistungsfähigkeit einer Strecke Typ M230 mit verschiedenen Mischungsverhältnissen.....</i>	<i>52</i>
<i>Abb. 10: Typische aerodynamische Widerstandsanteile bei Hochgeschwindigkeits- und Regionalzügen.....</i>	<i>53</i>
<i>Abb. 11: Leistungsfähigkeit von Eisenbahnstrecken .....</i>	<i>59</i>
<i>Abb. 12: Sperrzeiten.....</i>	<i>60</i>
<i>Abb. 13: Schematische Darstellung einer Überleit- und Abzweigstelle .....</i>	<i>84</i>
<i>Abb. 14: Behebung von Fahrstraßenkonflikten.....</i>	<i>92</i>
<i>Abb. 15: Erhöhung der Streckenkapazität infolge kürzerer Blockabstände.....</i>	<i>94</i>
<i>Abb. 16: Modellschema Kantenengpässe.....</i>	<i>106</i>
<i>Abb. 17: Modellschema Knotenengpässe.....</i>	<i>109</i>
<i>Abb. 18: Infrastruktur Knoten.....</i>	<i>111</i>
<i>Abb. 19: Modellschema La-Stellen.....</i>	<i>114</i>
<i>Abb. 20: Modellschema eingleisige Strecken .....</i>	<i>116</i>
<i>Abb. 21: Fahrplanrestriktionen eingleisige Strecke .....</i>	<i>118</i>
<i>Abb. 22: Zugfolge bei fliegender Überholung .....</i>	<i>119</i>
<i>Abb. 23: Modell eines Zuglaufes beim Passieren einer La-Stelle.....</i>	<i>124</i>
<i>Abb. 24: Streckenplan Wunstorf – Minden .....</i>	<i>133</i>

# Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Übersicht über die europäischen Bahnenergiesysteme .....	5
Tab. 2: Bremsenergieerückspeisung im Netz der DB im Jahr 2013 .....	13
Tab. 3: Zuschlagsfaktoren für rotierende Massen .....	22
Tab. 4: Beschleunigungswerte für verschiedene Zugarten .....	22
Tab. 5: Streckenparameter der Beispielstrecke .....	32
Tab. 6: Parameter der Beispielzüge .....	33
Tab. 7: Komponenten zur Berechnung des Fahrzeugwiderstandes eines Triebfahrzeugs vom Typ Stadler KISS .....	40
Tab. 8: Komponenten zur Berechnung des Fahrzeugwiderstandes einer Lokomotive der Baureihe 185 .....	41
Tab. 9: Komponenten zur Berechnung des Fahrzeugwiderstandes von Güterwagen .....	41
Tab. 10: Energiebedarfe je Anzahl an Halten aufgrund von Überholungen .....	47
Tab. 11: Zusammenfassung spez. Energiebedarfswerte je Zugkategorie .....	47
Tab. 12: Berücksichtigte Einzelmaßnahmen für ein Streckenelement .....	82
Tab. 13: Bau- und Instandhaltungskosten je Kilometer Streckenelement .....	83
Tab. 14: Kosten der Weichen für Streckenknoten, Typ Abzweigstelle .....	85
Tab. 15: Kosten der Weichen für Streckenknoten, Typ Überleitstelle .....	85
Tab. 16: Kosten Brückenkonfigurationen über andere Schienenstrecken .....	88
Tab. 17: Kostensätze Überwerfungsbauwerk für abzweigende Strecke .....	89
Tab. 18: Ausbaumaßnahmen Kantenengpässe .....	90
Tab. 19: Ausbaumaßnahmen Knotenengpässe .....	92
Tab. 20: Ausbaumaßnahmen Eingleisige Strecke .....	93
Tab. 21: Auflistung Einzelmaßnahmen .....	95
Tab. 22: Auflistung zusammengefasste Maßnahmen .....	96
Tab. 23: B1 - Zugzahlen für sehr hoch belastete Strecken .....	101
Tab. 24: B2 - Zugzahlen für hoch belastete Strecken .....	101
Tab. 25: B3 - Zugzahlen für durchschnittlich belastete Strecken .....	102
Tab. 26: B4 - Zugzahlen für eingleisige Strecken (SPNV) .....	102
Tab. 27: B5 - Zugzahlen für eingleisige Strecken (SPNV + SGV) .....	103
Tab. 28: Parameter Infrastruktur Knoten .....	111
Tab. 29: Näherungswerte für Einbruchsverspätungen .....	113
Tab. 30: Eingangsdaten Infrastruktur der eingleisigen Strecke .....	117
Tab. 31: Eingangswerte Berechnung Kreuzungsabschnittslänge .....	121
Tab. 32: Energiepreise .....	129
Tab. 33: Auswertung Kanten Energie + Kosten .....	132

Tab. 34: Infrastrukturkosten Wunstorf – Minden .....	134
Tab. 35: Kostenvergleich Beispielstrecke Wunstorf - Minden .....	135
Tab. 36: Auswertung Betriebsprogramm B1 pro Tag .....	137
Tab. 37: Auswertung Betriebsprogramm B2 pro Tag .....	138
Tab. 38: Energieeinsparungen Knoten pro Jahr.....	139
Tab. 39: Kostenersparnis Knoten pro Jahr.....	140
Tab. 40: Kostenersparnis Knoten (200 km/h) pro Jahr .....	140
Tab. 41: Infrastrukturkosten Beispielknoten.....	142
Tab. 42: Kostenvergleich Beispielknoten.....	142
Tab. 43: Vermiedene Verspätungsminuten Knoten .....	143
Tab. 44: Absoluter Energiemehrbedarf durch die La-Stellen pro Tag .....	144
Tab. 45: Relativer Energiemehrbedarf durch die La-Stellen pro Zug & Tag .....	145
Tab. 46: Absolute Energiemehrkosten aller La-Stellen pro Tag .....	145
Tab. 47: Gruppierung der La-Stellen nach Mangelkategorie.....	146
Tab. 48: Amortisationsdauer für die Investitionen zur Beseitigung der La-Stellen in der Mangelkategorie "Oberbaumangel" .....	148
Tab. 49: Amortisationsdauer für die Investitionen zur Beseitigung der La-Stellen in der Mangelkategorie Untergrundmangel.....	150
Tab. 50: Amortisationsdauer für die Investitionen zur Beseitigung der La-Stellen in der Mangelkategorie LST – Beschränkung BÜ .....	151
Tab. 51: Amortisationsdauer für die Investitionen zur Beseitigung der La-Stellen in der Mangelkategorie Brücken.....	152
Tab. 52: Amortisationsdauer für die Investitionen zur Beseitigung der La-Stellen in der Mangelkategorie eingeschränkte Sicht.....	154
Tab. 53: Amortisationsdauer für die Investitionen zur Beseitigung der La-Stellen in der Mangelkategorie Reisendensicherung.....	157
Tab. 54: Amortisationsdauer für die Investitionen zur Beseitigung der La-Stellen in der Mangelkategorie Schleppkurve .....	159
Tab. 55: Übersicht Kosteninformationen aller betrachteten La-Stellen.....	160
Tab. 56: Gesamtzeiterparnis für jede Mangelkategorie .....	163
Tab. 57: Auswertung eingleisige Strecken Energie + Kosten.....	165
Tab. 58: Infrastrukturkosten Langwedel – Uelzen.....	167
Tab. 59: Kostenvergleich Beispielstrecke Langwedel – Uelzen.....	168
Tab. 60: Verhältnis Energieeinsparung / Gesamtkosten.....	173

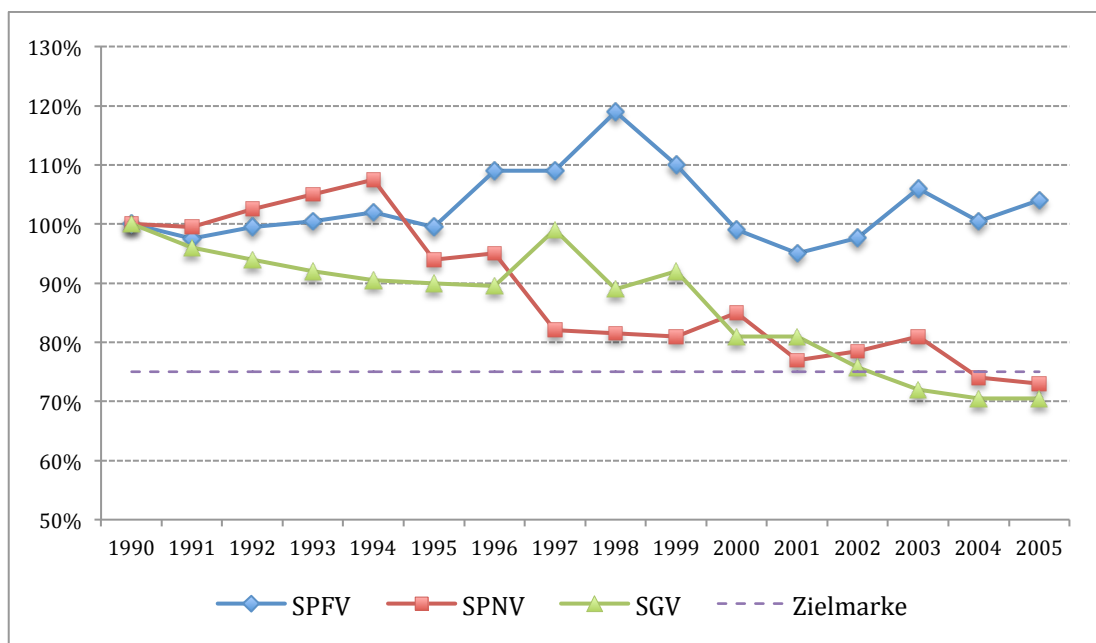
## Abkürzungsverzeichnis

<b>A</b>	AC	Wechselstrom
<b>B</b>	BÜ	Bahnübergang
	Bt	Bruttotonne
	BVWP	Bundesverkehrswegeplan
<b>D</b>	DB	Deutsche Bahn AG
	DC	Gleichstrom
	DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
<b>E</b>	EBO	Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung
	ETCS	European Train Control System
	EVU	Eisenbahnverkehrsunternehmen
<b>H</b>	HGV	Hochgeschwindigkeitsverkehr
<b>L</b>	La-Stelle	Langsamfahrstelle
	LSA	Lichtsignalanlage
	LST	Leit- und Sicherungstechnik
	Lt	Lasttonne
	LZB	Linienförmige Zugbeeinflussung
<b>P</b>	PU	Personenunterführung
<b>R</b>	RÜ	Reisendenübergang
<b>S</b>	SGV	Schienengüterverkehr
	SPFV	Schienenpersonenfernverkehr
	SPNV	Schienenpersonennahverkehr
<b>U</b>	Uw	Unterwerk

# 1 Einleitung

Die Einsparung elektrischer Energie ist seit geraumer Zeit ein großes Thema bei der Deutschen Bahn AG (DB). Mit dem „Energiesparprogramm 2005“ schuf die DB bereits im Jahr 1994 ein Programm, welches die Senkung der spezifischen Energieverbräuche im Schienenverkehr sowie der absoluten Verbräuche der stationären Anlagen bis zum Jahr 2005 um jeweils 25 % im Vergleich zum Jahr 1990 zum Ziel hatte [Vgl. Seifert 2003, S. 754].

**Abb. 1: Entwicklung des spezifischen Primärenergieverbrauchs bei der DB von 1990-2004<sup>2</sup>**



Quelle: Veränderte Darstellung nach: Seifert 2003, S. 756; DB 2005a, S. 53; DB 2007, S. 7

<sup>2</sup> Da die Quelle DB 2005a die spezifischen Primärenergieverbräuche nur bis zum Jahr 2004 darstellt, muss noch die Quelle DB 2007 genutzt werden. Da aber in dieser Quelle keine prozentuale Entwicklung für das Jahr 2005 angegeben ist, wurde zusätzlich die Quelle DB 2005b hinzugezogen. Mit ihr wurden die spezifischen Primärenergieverbräuche für das Jahr 2003 mit den prozentualen Angaben aus der Quelle DB 2005a verglichen. Auf dieser Basis konnte für das Jahr 2005 die prozentuale Entwicklung in Bezug zum Basisjahr 1990 dargestellt werden.

Auch wenn die Abb. 1 zeigt, dass das Ziel des Programms teilweise erreicht wurde, so bleibt das Thema der Energieeinsparung weiter aktuell, auch bei anderen Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU). Viele Studien und Publikationen listen eine Vielzahl an möglichen Maßnahmen zur Energiebedarfsreduzierung auf. Häufig werden dabei die Lösungsräume Betrieb und Fahrzeugtechnik betrachtet (siehe Kapitel 4.1 und 4.2). Doch eine alleinige Fokussierung auf das rollende Material sowie den operativen Betrieb ist unzureichend. Denn der zu planende Betrieb ist hochgradig abhängig von der verfügbaren Infrastruktur. Diese besitzt eine hohe Langlebigkeit, weshalb sie stets mit Weitsicht geplant werden muss um zukünftige Aufkommenssteigerungen aufnehmen zu können. Diese Arbeit widmet sich daher dem Ziel der infrastrukturseitigen Optimierung zur Verbesserung des Betriebsablaufs und der damit verbundenen Reduzierung des Energiebedarfs.

Dabei sollen mit Hilfe einer Engpassanalyse diejenigen Stellen in der vorhandenen Infrastruktur ermittelt werden, die zu einem erhöhten Energiebedarf im Zuge von Behinderungen des Betriebsablaufs führen. Diese Engpassstellen werden anschließend analysiert und mittels infrastruktureller Maßnahmen beseitigt. Zudem werden mehrere Betriebsprogramme konzipiert, die über eine Engpassstelle gelegt werden, um die jeweiligen Energieeinsparpotentiale zu ermitteln und monetär zu bewerten. Dabei wird zwischen den drei Zugkategorien Schienenpersonenfernverkehr (SPFV), Schienenpersonennahverkehr (SPNV) und Schienengüterverkehr (SGV) unterschieden. Abschließend wird eine Gegenüberstellung der Kosten für die infrastrukturellen Maßnahmen und der Energieeinsparungen für jede Engpasskategorie durchgeführt.

Dazu werden in dieser Arbeit einführend der Aufbau und die Funktionsweise der Bahnenergieversorgung in Deutschland beschrieben. Anschließend erfolgt in Kapitel 3 die Herleitung der Energieberechnung, die in dieser Arbeit verwendet wird. Im vierten Kapitel wird ein Auszug an publizierten Lösungen und Maßnahmen für die drei Lösungsräume betriebliche Optimierung, fahrzeugseitige Optimierung und Infrastrukturelle Optimierung vorgestellt. Die bereits erwähnte Engpassanalyse, bei der verschiedene Engpasskategorien definiert wer-



den, wird im fünften Kapitel erläutert und durchgeführt. Daraufgehend werden die bereits angesprochenen infrastrukturellen Einzelmaßnahmen recherchiert und zu Maßnahmenpaketen zusammengefasst. In Kapitel 7 erfolgt die Modellierung eines Betriebsprogramms, welches zur Analyse der potentiellen Energieeinsparungen dient. Im achten Kapitel werden die bis dahin gesammelten Erkenntnisse auf die definierten Engpasskategorien angewendet. Es werden sowohl die Energieeinsparungen, als auch die Aufwendungen für die jeweilige infrastrukturelle Maßnahme zur Beseitigung des Engpasses monetär bewertet und gegenübergestellt. Beendet wird das achte Kapitel mit einer kritischen Würdigung. Die Arbeit wird mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick auf weiteren Forschungsbedarf abgeschlossen.

## 2 Bahnenergie Technische Grundlagen

Dieses Kapitel befasst sich mit dem Aufbau und der Funktionsweise der Energieversorgung<sup>3</sup> für die Bahnsysteme in Deutschland. Dabei wird der Weg von der Erzeugung über die Verteilung bis hin zur Rückführung beschrieben. Zudem behandelt dieses Kapitel die Fahrleistung von Schienenfahrzeugen und betrachtet den Zusammenhang mit dem Energieverbrauch. Aus Gründen der Vollständigkeit werden abschließend Elemente der Infrastruktur vorgestellt, die ebenfalls einen Energiebedarf aufweisen.

### 2.1 Energieversorgung des Bahnsektors in Deutschland

Die „Aufgabe [...] der Bahnenergieversorgung ist es, einen ungestörten, zuverlässigen und sicheren Bahnbetrieb mit der elektrischen Zugförderung zu ermöglichen.“ [Schmidt 1988, S. 10]. Dazu müssen die Netze der Bahnenergieversorgung spezifische Anforderungen, wie beispielsweise dauerhafte Bereitstellung der Energie oder auch entsprechende Qualitätsparameter für die Spannungshöhe, Frequenz und Leistungsfähigkeit, erfüllen. [Vgl. Stephan/Zweig 2013, S. 681]

In Europa existieren, auch bedingt durch die lange Historie der Eisenbahn, verschiedene Bahnenergieversorgungstechniken, welche in Tab. 1 aufgelistet werden. Eine grafische Darstellung bzgl. der Verbreitung der verschiedenen Energiesysteme in Europa findet sich im Anhang 1.

---

<sup>3</sup> Wird in dieser Arbeit von Energie gesprochen, so ist immer die elektrische Bahnenergie gemeint.

**Tab. 1: Übersicht über die europäischen Bahnenergiesysteme<sup>4</sup>**

	Nenn- spannung	Anwendungsbereich (Beispiele)
Gleichstrom	<b>600 V</b>	Straßenbahn
	<b>750 V</b>	U-Bahn Berlin
	<b>1,2 kV</b>	S-Bahn Hamburg
	1,5 kV	Vollbahnen (zum Beispiel Niederlande)
	2,4 kV	Industriebahnen
	3 kV	Vollbahnen (zum Beispiel Polen)
Einphasenwechselstrom	11 kV	Schmalspurbahn Schweiz
16,7 Hz	<b>15 kV</b>	Vollbahnen (zum Beispiel Deutschland)
Einphasenwechselstrom	10 kV	Industriebahnen
50 (60) Hz	25 kV	Vollbahnen (zum Beispiel Frankreich)
	50 kV	Spezialbahnen

Quelle: Veränderte Darstellung nach: Stephan/Zweig 2013, S. 686

Wie in Tab. 1 erkennbar, existieren in Deutschland zwei verschiedene Bahnenergieversorgungssysteme. Zum einen der Gleichstrom (DC), welcher die älteste Form der Bahnenergieversorgung darstellt,<sup>5</sup> sowie der Wechselstrom (AC).

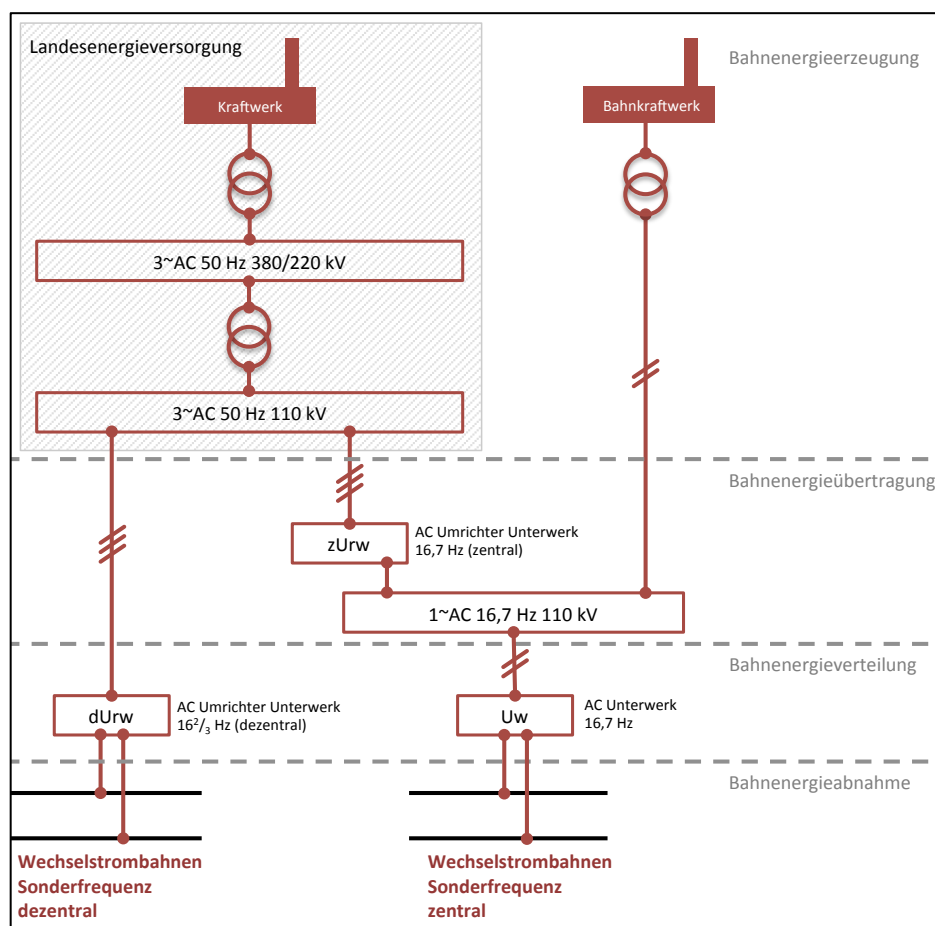
Der Nachteil des Gleichstroms bei der Fernbahnelektrifizierung liegt in seiner Nichttransformierbarkeit und in der damit verbundenen Maximalspannung von 3 kV. Dies hat zur Folge, dass entlang einer Strecke zahlreiche Einspeisungen notwendig sind. [Vgl. Stephan/Zweig 2013, S. 684] Daher wird heutzutage in Deutschland der Gleichstrom ausschließlich im städtischen Nahverkehr eingesetzt. So fahren zum Beispiel die U-Bahnen der Berliner Verkehrsbetriebe mit 750 V DC und die Berliner S-Bahn mit 800 V DC bzw. die Hamburger S-Bahn mit 1,2 kV DC [Vgl. BVG 2014, S. 14; Vgl. Reinhardt 2012, S. 273]. Da sich diese Masterarbeit, wie in der Einleitung bereits erläutert, nur mit den Verkehren des SPFV, SPNV und des SGV beschäftigt, wird die Thematik des Gleichstroms nicht weiter betrachtet.

<sup>4</sup> Die in Tabelle fett markierten Werte werden in Deutschland verwendet.

<sup>5</sup> Die ersten öffentlichen DC-Bahnen entstanden in Deutschland um 1880. Die Begründung liegt in der damaligen Verwendung der bereits bekannten Gleichstrom-Reihenschlussmaschine als Fahrmotor. [Vgl. Stephan/Zweig 2013, S. 684].

Die zweite Art der in Deutschland verwendeten Bahnenergie ist der Wechselstrom. Zum Anfang des 20. Jahrhunderts gab es zahlreiche Versuche, die Vorteile des Wechselstroms mit den guten Eigenschaften des Reihenschlussmotors<sup>6</sup> zu verknüpfen. Nach zahlreichen Untersuchungen wurde als Ergebnis ein Einphasen-AC-System mit einer Nennspannung von 15 kV und einer reduzierten Nennfrequenz von  $16\frac{2}{3}$  Hz entwickelt<sup>7</sup>, welches in den Jahren 1912/1913 in Deutschland von mehreren Eisenbahngesellschaften eingeführt wurde und sich damit in Deutschland zum Standard der Energieversorgung von Vollbahnen entwickelt hat. [Vgl. Stephan/Zweig 2013, S. 684 f.]

**Abb. 2: Prinzipieller Aufbau der Bahnenergieversorgung in Deutschland**



Quelle: Veränderte Darstellung nach: Stephan 2014, S. 23

<sup>6</sup> Der Gleichstrom-Reihenschlussmotor wurde in den Anfängen der elektrischen Traktion aufgrund seiner günstigen Zugkraft-Geschwindigkeit-Charakteristik bevorzugt eingesetzt. Daher werden auch heutzutage noch viele elektrische Bahnen in aller Welt mit Gleichstrom versorgt. [Vgl. Schmidt 1988, S. 11]

<sup>7</sup> Die  $16\frac{2}{3}$  Hz-Frequenz entstand durch die Drittelung der Industriefrequenz von 50 Hz ( $50/3 = 16\frac{2}{3}$ ).

In Deutschland existieren heute zwei Möglichkeiten zur Bahnenergieversorgung mit AC-Strom. Zum einen die in der Abb. 2 auf der linken Seite dargestellte dezentrale Energieversorgung, welche aus historischen Gründen noch besteht, aber im Zuge fortlaufender Modernisierung Stück für Stück ersetzt wird (siehe auch Kapitel 2.1.2). Der andere Weg ist die zentrale Bereitstellung der Bahnenergie aus einem eigenen vom 50 Hz Landesnetz unabhängig betriebenen Überleitungsnetz (siehe Abb. 2). Der größte Anteil der zentral bereitgestellten Bahnenergie wird dabei von eigenen Bahnkraftwerken erzeugt (siehe Kapitel 2.1.1). Ein weiterer Teil wird mittels Umformer bzw. Umrichter aus dem 50 Hz Landesnetz in das 110 kV Bahnenergienetz eingespeist. [Vgl. Stephan/Zweig 2013, S. 691 f.]

Der Prozess der Bahnenergieversorgung kann in sechs Abschnitte unterteilt werden (siehe Abb. 3). Die jeweiligen Vorgänge innerhalb der sechs Abschnitte werden in den Kapiteln 2.1.1 bis 2.1.6 beschrieben.

**Abb. 3: Kreislauf der Bahnenergieversorgung**



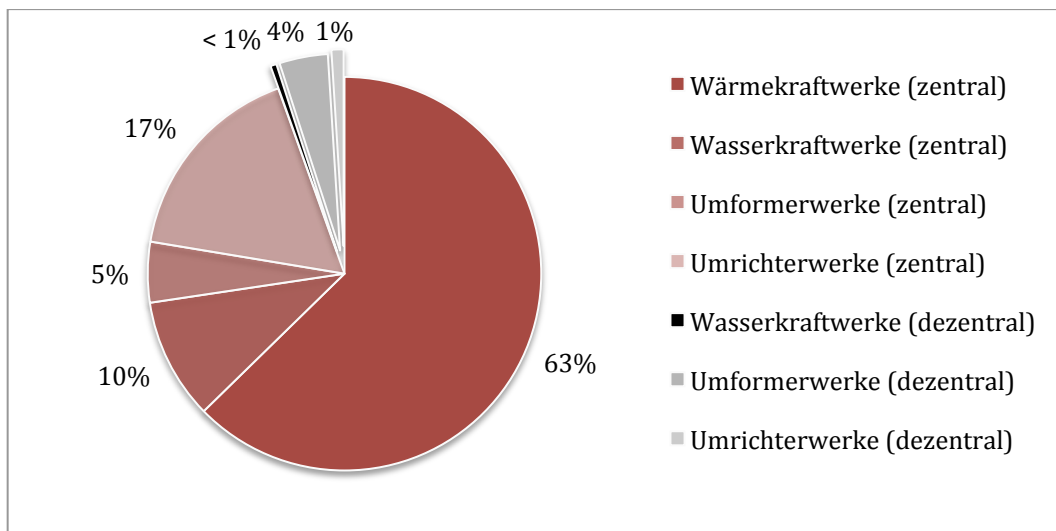
Quelle: Eigene Darstellung nach: Stephan/Zweig 2013, S. 681f.

### 2.1.1 Bahnenergieerzeugung

Wie eingangs beschrieben und in der Abb. 2 visualisiert, wird die Energie für das Bahnstromnetz in erster Linie durch bahneigene Kraftwerke erzeugt, sowie durch Umrichter/Umformer, die ihre Energie direkt aus dem 50 Hz Landesnetz beziehen und in das Bahnstromnetz einspeisen.

Die Abb. 4 zeigt die Zusammensetzung der Bahnenergie in Deutschland im Jahr 2009. Die DB Energie nutzt vor allem Wärmekraftwerke, im speziellen Kohle- und Kernkraftwerke, die die Grundlastversorgung übernehmen [Vgl. DB Energie 2014b]. Zur Spitzenlastversorgung werden unter anderem Wasserkraftwerke (z.B. Pumpspeicherkraftwerke), Umrichterwerke und die Stromversorgung aus dem Ausland genutzt [Vgl. DB Energie 2010, S. 8 f.]. Die so produzierte Energie wird mit 16,7 Hz und 110 kV im bahneigenen Energiehochspannungsnetz für die Verteilung an die jeweiligen Unterwerke (Uw) transportiert. Dort findet die finale Transformation auf 16,7 Hz mit 15 kV und die anschließende Einspeisung in die Fahrleitung statt (siehe Abb. 2).

**Abb. 4: Zusammensetzung der Bahnenergie in Deutschland im Jahr 2009**



Quelle: Veränderte Darstellung nach: Perschbacher 2011, S. 51

## 2.1.2 Bahnenergieübertragung

Die bereits im Kapitel 2.1.1 im Ansatz beschriebene zentrale Bahnenergieversorgung besteht aus einem 7.755 km langen und vom Landesnetz unabhängig betriebenen Hochspannungsnetz, welches eine Frequenz von 16,7 Hz und die bekannte Spannung von 110 kV aufweist [Vgl. Leister 2011, S. 146]. Dieses Hochspannungsnetz besteht fast vollständig aus Freileitungen. Der Zweck dieses Netzes liegt in der Übertragung des produzierten Stroms an die jeweiligen

Uw<sup>8</sup>, die sich an den Strecken befinden. Dabei ist das Netz an mehreren Stellen auch mit den Bahnenergienetzen der Schweizerischen Bundesbahnen und der Österreichischen Bundesbahnen verbunden. [Vgl. Perschbacher 2011, S. 52] Eine grafische Übersicht des Bahnstromnetzes befindet sich im Anhang 2.

Bei der dezentralen Bahnenergieübertragung wird die Bahnenergie direkt an der Strecke durch kleinere Umformer-/Umrichtereinheiten bereitgestellt. Dabei wandelt ein rotierender Umformer die 50 Hz Energie aus dem Landesnetz in  $16\frac{2}{3}$  Hz mit 15 kV AC Bahnenergie um [Vgl. Filipovic 2005, S. 245 f.; Vgl. Stephan/Zweig 2013, S. 691]. Da die mechanischen Umformer langfristig durch Umrichter mit Leistungselektronik ersetzt werden, wird es in Zukunft nur noch 16,7 Hz in Deutschland geben [Vgl. DB Energie 2014a]. Die Form der dezentralen Energieversorgung kommt aktuell nur noch im Nordosten Deutschlands vor (siehe auch Anhang 2) [Vgl. Steimel 2006, S. 236].

### 2.1.3 Bahnenergieverteilung

Die Verteilung der Bahnenergie in die Fahrleitungen erfolgt abschnittsweise<sup>9</sup> über die Uw (siehe Anhang 3). Diese befinden sich zumeist direkt neben der Strecke [Vgl. Filipovic 2005, S. 249]. Wie in Kapitel 2.1.1 bereits beschrieben erhält das Uw dabei seine Energie entweder direkt aus dem 50 Hz Landesnetz oder aus dem 16,7 Hz Bahnenergienetz. Die Zuführung zur Fahrleitung der Strecke erfolgt vom Uw zumeist mit Erdkabeln oder kurzen Freileitungen [Vgl. Stephan/Zweig 2013, S. 696]

### 2.1.4 Bahnenergiezuführung

Die Bahnenergiezuführung zu den Schienenfahrzeugen erfolgt über die Fahrleitung<sup>10</sup>. Die Fahrleitung dient damit sowohl der Energieübertragung als auch der

---

<sup>8</sup> Insgesamt werden von den Bahnenergieleitungen 181 Unterwerke mit Strom versorgt [Vgl. Perschbacher 2011, S. 52].

<sup>9</sup> Die Länge eines Abschnitts sowie die Leistungsfähigkeit eines Unterwerks ist abhängig von der vorhandenen Streckenbelastung in diesem Abschnitt während einer definierten Zeitperiode [Vgl. Schmidt 1988, S. 13].

<sup>10</sup> Der Fahrdraht besteht dabei zumeist aus reinem hochwertigem Kupfer oder aus einer Kupfer-Legierung [Vgl. Stephan/Zweig 2013, S. 700].

Energieabgabe und besitzt eine definierte Lage zum Gleis [Vgl. Filipovic 2005, S. 256; Vgl. Stephan/Zweig 2013, S. 684]. Die Fahrleitung kann als Oberleitung oder als seitlich geführte Stromschiene ausgeführt sein, wobei letzteres vor allem bei städtischen Untergrund- und Schnellbahnsystemen verwendet wird [Vgl. Steimel 2006, S. 260]. Die Fahrleitung als einfache Ausführung mit nur einem Fahrdraht kommt vor allem bei Straßenbahnen vor. Auf den Strecken des Nah- und Fernverkehrs, die mit höheren Geschwindigkeiten befahren werden, besteht die Oberleitung fast ausschließlich aus einem Längskettenwerk [Vgl. Stephan/Zweig 2013, S. 699]. Die Oberleitung ist dabei in einer Zick-Zack-Form verlegt, damit der Stromabnehmer gleichmäßig beansprucht und verschleißt wird. Dabei wird der Fahrdraht von sogenannten Hängern, die mit dem Tragseil verbunden sind, gehalten. [Vgl. Steimel 2006, S. 256]

Die Zwitterform der Stromschieneoberleitung wird aufgrund ihrer geringen Bauhöhe vor allem in Tunneln eingesetzt. Sie besteht zumeist aus einem Aluminiumprofil, welches den Fahrdraht einklemmt und damit trägt [Vgl. Steimel 2006, S. 256].

### **2.1.5 Bahnenergieabnahme**

Die Energieabnahme erfolgt durch den Stromabnehmer<sup>11</sup> des Schienenfahrzeugs, der mit seinem Schleifstück<sup>12</sup> den Fahrdraht berührt und damit einen Kontakt herstellt, über den die elektrische Energie aus der Infrastruktur in das Fahrzeug geleitet wird. Dabei wird der Stromabnehmer mittels Hubfedern mit annähernd konstanter Kraft gegen den Fahrdraht gedrückt, um einen dauerhaften Kontakt zu ermöglichen. [Vgl. Steimel 2006, S. 257 f.]

---

<sup>11</sup> Viele Triebfahrzeuge werden aus Sicherheitsgründen mit zwei Stromabnehmern ausgestattet, wobei der zweite als Reserve dient. Der in Fahrtrichtung vordere Stromabnehmer wird abgesenkt, so dass er im Falle einer Havarie des verwendeten Stromabnehmers unbeschädigt bleibt. Daher wird im Regelfall immer mit dem in Fahrtrichtung hinteren Stromabnehmer gefahren [Vgl. Filipovic 2005, S. 170].

<sup>12</sup> Die Schleifstücke des Stromabnehmers können aus Aluminium, Kupfer oder aus Kohle bestehen. Aluminium wird vor allem bei hohen Geschwindigkeiten eingesetzt, da diese Schleifstücke leicht sind. Nachteilig wirkt sich aber die verstärkte Riffelbildung am Fahrdraht aus. Kupfer sorgt für eine gute Stromabnahme, auch bei einer vereisten Oberleitung und eignet sich ideal für hohe Ströme. Schleifstücke aus Kohle besitzen zwar einen relativ hohen Übergangswiderstand, dennoch sind fast alle Schienenfahrzeuge mit Schleifstücken aus Kohle ausgestattet, da diese eine schmierende Wirkung aufweisen und so den Fahrdraht schonen. Zudem verursachen sie geringere Hochfrequenzstörungen. [Vgl. Filipovic 2005, S. 170]



Moderne elektrische Lokomotiven und Triebfahrzeuge werden seit rund 30 Jahren mit Drehstromantriebstechnik ausgeführt. Dabei versorgt ein an Bord befindlicher Umrichter die Fahrmotoren mit einer dreiphasigen Spannung, um die Zugkraft bereitstellen zu können.

### 2.1.6 Bahnenergie-rückführung

Zuletzt erfolgt die Rückführung der Bahnenergie mittels Rückleiterseilen oder durch die Gleise und das Erdreich<sup>13</sup>. Die Rückleitung muss durch eine gut leitende Verbindung zwischen den Triebfahrzeugen und den Unterwerksstellen hergestellt werden. Auf den meisten Strecken sind die Schienen das Hauptelement der Rückleitung. Zu Verbesserung der Leitfähigkeit werden Schienenquerverbinder<sup>14</sup> und Gleisverbinder<sup>15</sup> eingesetzt. Eine ergänzende Maßnahme sind Rückleiterseile. Diese werden verwendet, um die Rückleitungsverhältnisse ggf. zu verbessern [Vgl. Stephan/Zweig 2013, S. 747 f.].

### 2.1.7 Bahnenergie-rückgewinnung (Exkurs)

Dieses Kapitel dient der kurzen Beschreibung, wie die Energierückgewinnung funktioniert. Sie ist insofern wichtig, als dass Sie einen immer weiter steigenden Anteil an der Gesamtenergieversorgung einnimmt [Vgl. Kettner 2011, S. 91].

Früher wurde beim Bremsvorgang eines Schienenfahrzeugs die durch die Bremswiderstände erzeugte Energie ungenutzt als Wärme in die Umgebung abgelassen.<sup>16</sup> Die in Kapitel 2.1.5 beschriebenen Drehstromfahrzeuge sind in der Lage, mittels einer generatorischen Bremse, Bremsenergie in elektrische Energie umzuwandeln und diese in die Fahrleitung einzuspeisen. Eine Leistungselektronik wandelt diese Energie in einen einphasigen Wechselstrom um und

---

<sup>13</sup> Aufgrund einer schlechten Isolierung der Schienen gegen die Erde fließt der Strom durch das Erdreich [Vgl. Biesenack et al. 2006, S.623].

<sup>14</sup> Schienenquerverbinder verbinden die einzelnen Schienen eines Gleises. Dies wird eingesetzt um beispielsweise Isolierstöße zu überbrücken [Vgl. Stephan/Zweig 2013, S. 747].

<sup>15</sup> Gleisverbinder verbinden die Gleise untereinander [Vgl. Stephan/Zweig 2013, S. 747].

<sup>16</sup> Dies trifft auf die generatorische Bremsung zu. Die Energie wurde dabei zwar erzeugt, konnte aber nicht genutzt werden.

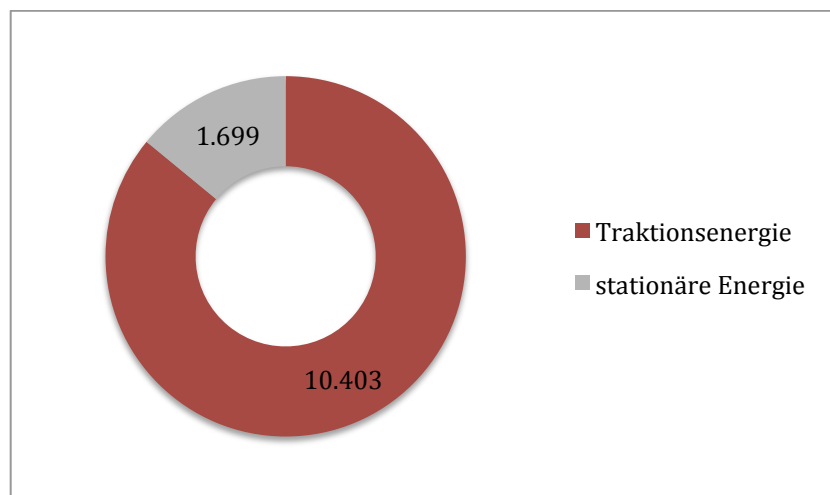
gibt sie in die Fahrleitung ab. [Vgl. Stephan/Zweig 2013, S. 697; Vgl. Kettner 2011, S. 91]

Zu beachten ist, dass Bahnenergie-rückführung und -rückgewinnung nicht ein und dasselbe sind. Sie unterscheiden sich in dem Punkt, dass die Bahnenergie-rückführung via Schiene und Rückleiter keinen Beitrag zur Energiereduzierung leistet. Die Bahnenergie-rückgewinnung hingegen erfolgt über die Fahrleitung und trägt zur Energieeinsparung bei (siehe auch Kapitel 2.2.1).

## 2.2 Elektrische Verbraucher

Zu den elektrischen Verbrauchern im Netz gehören in erster Linie die Fahrzeuge. Deren Energiebedarf wird unter dem Begriff der Traktionsenergie zusammengefasst. Die anderen Verbraucher sind stationäre Anlagen wie Signale, Weichenheizungen und Anlagen in Bahnhöfen.

**Abb. 5: Verbrauch von Traktionsenergie und stationärer Energie im Jahr 2012 [in GWh]**



Quelle: Eigene Darstellung nach: DB 2013, S.46

Die DB Netz hat im Jahr 2012 ca. 12.102 Gigawattstunden (GWh) an Energie bereit gestellt (siehe Abb. 5). Davon entfällt mit rund 86 % der Großteil der ver-

brauchten Energie auf die Traktionsenergie, die restlichen 14 % auf die stationäre Energie.<sup>17</sup> [Vgl. DB 2013, S. 46]

### 2.2.1 Traktionsenergie

Die Traktionsenergie umfasst sämtliche Energien, die aus der Oberleitung von den Schienenfahrzeugen bezogen werden. Dazu gehört primär die Energie für das Beschleunigen und für das Beharren bei einer Geschwindigkeit, aber auch die Energie, die von Hilfssystemen, wie beispielsweise der Klimaanlage, benötigt wird. Die Menge an benötigter Energie richtet sich beim Beschleunigen in erster Linie nach der Masse des Schienenfahrzeuges, beim Beharren hingegen nach den Widerständen, vor allem nach dem aerodynamischen Widerstand (siehe auch Kapitel 3.1.1). [Vgl. Marek et al. 2010, S. 714]

**Tab. 2: Bremsenergie-rückspeisung im Netz der DB im Jahr 2013**

	Bremsenergie- rückspeisung [in GWh]	Anteil am Gesamtenergiebezug [in %]
Schienenpersonennahverkehr	620	14
Schienenpersonenfernverkehr	279	11
Schienengüterverkehr	140	6
<b>Insgesamt:</b>	<b>1.040</b>	<b>11</b>

Quelle: Veränderte Darstellung nach: DB 2014a, S. 137

Die Grundproblematik bei der Beibehaltung einer Geschwindigkeit ist der Umstand, dass die dafür benötigte Energie in Bewegung und Wärme umgewandelt wird und bezüglich der Wiederverwendung als elektrische Energie unwiederbringlich verloren ist.<sup>18</sup> Bei modernen Fahrzeugen kann zumindest die kinetische Energie, die das Fahrzeug nach dem Beschleunigen innehat, teilweise wie-

<sup>17</sup> Die angegebenen Werte stammen vom Nachhaltigkeitsbericht der DB aus dem Jahr 2012. Es sei erwähnt, dass der Geschäftsbericht 2013 der DB (siehe Quelle: DB 2014a, S. 178) im Vergleich zum Nachhaltigkeitsbericht andere Werte für den elektrischen Verbrauch im Jahr 2012 ausgibt. Leider sah sich die DB nicht imstande anzugeben, welche Werte für das Jahr 2012 korrekt sind. Daher werden die Werte aus dem Nachhaltigkeitsbericht übernommen, ohne die Garantie, dass diese Werte der Realität entsprechen.

<sup>18</sup> Nach dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik geht Energie nie verloren, sondern wird nur umgewandelt. So kann beispielsweise elektrische Energie in kinetische und thermische Energie umgewandelt werden.

der beim Abbremsen des Fahrzeuges in das Netz zurückgespeist werden [Vgl. Marek et al. 2010, S. 714; Vgl. DB 2015b]. Die Menge der Bremsenergie, welche im Netz der DB im Jahr 2013 in das Netz zurückgespeist wurde, ist in Tab. 2 dargestellt.

### 2.2.2 Stationäre Energie

Neben den Fahrzeugen und ihrem Bedarf an Energie für die Traktion existiert eine Vielzahl an stationären Einrichtungen und Komponenten, die ebenfalls einen Bedarf an elektrischer Energie aufweisen. Dazu gehören u.a. Anlagen der Leit- und Sicherungstechnik (LST), der Telekommunikation, Bahnhöfe und Haltestellen, Tunnelanlagen sowie Zugbehandlungsanlagen. Diese beziehen ihre Energie im Regelfall aus dem bahneigenen Hochspannungsnetz, welches wiederum aus dem örtlichen Netz gespeist wird. [Vgl. Hunger/Mohrich 2013, S. 757; Vgl. Petermann et al. 2010, S. 92] Es finden sich in der Infrastruktur auch Anlagen die direkt mit Energie aus dem 16,7 Hz Oberleitungsnetz versorgt werden. Dazu gehören u.a. Zugvorheizanlagen, aber auch die meisten Weichenheizungen, die durch ihre steigende Anzahl einen immer größeren Bedarf an elektrischer Energie aufweisen. [Vgl. DB 2015a; Vgl. Hunger/Mohrich 2013, S. 757] So verbrauchten die bisher installierten Weichenheizungen rund 230 GWh im Jahr [Vgl. Bundesregierung 2013].<sup>19</sup>

Abschließend soll hier noch der Gesamtenergieverbrauch für alle 5.400 Bahnhöfe und Haltestellen der DB Station & Service AG im Jahr 2013 benannt werden. Dieser lag bei 1.060 GWh [Vgl. Pott-Stahmeyer/Heibel 2014, S. 30]. Zu den Verbrauchern gehören u.a. Beleuchtung, Aufzüge und Fahrtreppen, Verwaltungs- und Mitarbeiteräume sowie Gewerbe- und Werbeflächen.

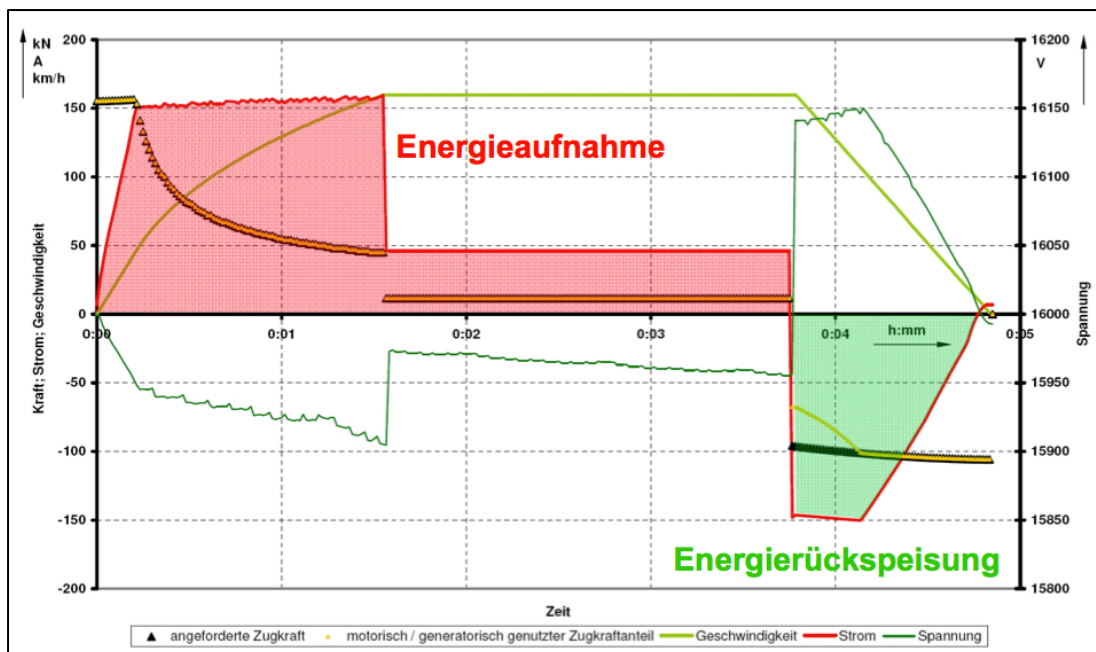
---

<sup>19</sup> Das entspricht rund 13,5 % des Gesamtbedarfs aller stationären Anlagen.

### 3 Energetische Herleitung

Die Bewegung eines Schienenfahrzeugs ist ein Prozess der Ortsveränderung, der Widerstände hervorruft, die mittels mechanischer Energie überwunden werden müssen. Die mechanische Energie wird bei elektrischen Bahnsystemen „[...] über einen Energieumwandlungsprozess aus elektrischer Energie gewonnen.“ [Biesenack et al. 2006, S. 17] Der Energieumwandlungsprozess geht einher mit einem Leistungstransport, welcher abhängig von der Höhe der Widerstände ist.<sup>20</sup> [Vgl. Biesenack et al. 2006, S. 17]

**Abb. 6: Verlauf des Energieverbrauchs während einer Fahrt**



Quelle: Stephan 2014, S. 19

<sup>20</sup> Beschrieben werden diese Zusammenhänge in der Fahrzeugdynamik. Dazu gehören alle Kräfte, die einen Bewegungsvorgang entstehen lassen, ihn erhalten, ändern oder auch verhindern können. [Vgl. Biesenack et al. 2006, S. 17] Wer sich in die detaillierte Betrachtung der einzelnen Widerstände einlesen möchte, dem sei Wende 2003 empfohlen.

Einen Bewegungsvorgang, der einen großen Energiebedarf aufweist, stellt der Beschleunigungsvorgang dar (siehe Abb. 6). Dies liegt in den physikalischen Rahmenbedingungen begründet, die eine Beschleunigung mit sich bringt. So müssen, vereinfacht gesagt, neben den Rollwiderständen auch die Anfahrwiderstände überwunden werden, um das Schienenfahrzeug in Bewegung zu versetzen. Nach dem Beschleunigungsvorgang sinkt die Energieaufnahme drastisch, da nun nur noch eine Kraft aufgebracht werden muss, die gleich der bestehenden Roll- und Luftwiderstände ist. Wie sich diese Kraft zusammensetzt und wie sich dies energetisch auswirkt, wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit beschrieben.

### 3.1 Energiebedarf elektrischer Bahnen

Der Inhalt dieses Kapitels ist die systematische Herleitung des Energiebedarfs von Schienenfahrzeugen, wie er später für die Ermittlung der Energiemehrbedarfe aufgrund der Engpässe benötigt wird. Dazu wird mittels der Berechnung von spezifischen Widerständen der Energiebedarf eines Schienenfahrzeuges für die Phasen Beschleunigung und Beharrung ermittelt.

#### 3.1.1 Ausgangsgröße: Widerstände<sup>21</sup>

Wenn ein Fahrzeug mit einer konstanten Geschwindigkeit  $v$  bewegt werden soll, so muss die Kraft  $F$  gleich der Summe der Widerstände  $W$  sein. Dies gibt die nachfolgende Gleichung wieder.<sup>22</sup>

$$F = W \quad [N] \quad (3.1)$$

mit  $F$  = Kraft [N]  
 $W$  = Widerstand [N]

<sup>21</sup> Es sei darauf hingewiesen, dass bei Formeln die sich innerhalb eines Kapitels der dritten Überschriftenebene befinden, die verwendeten Einheiten nur beim erstmaligen Erscheinen benannt werden.

<sup>22</sup> Es sei darauf hingewiesen, dass die jeweiligen Werte in jeder Formel ggf. in ihre entsprechend richtigen Einheiten umgerechnet werden. Dies wird in den Formeln nicht explizit dargestellt. Ein Beispiel: Obwohl die Geschwindigkeit  $v$  standardmäßig in der Einheit  $km/h$  angegeben wird, so wird sie in einigen Formeln auch in der Einheit  $m/s$  verwendet, ohne dass dieser Umrechnungsschritt dargestellt wird.

Die Widerstände unterteilen sich dabei in:

- Fahrzeugwiderstand  $[W_f]$
- Bogenwiderstand  $[W_b]$
- Neigungswiderstand  $[W_s]$
- Beschleunigungswiderstand  $[W_a]$

Die Gleichung für die Berechnung des Gesamtwiderstands  $W$  lautet wie folgt:

$$W = W_f + W_b + W_s + W_a \quad [N] \quad (3.2)$$

Zusammen mit der Gleichung (3.1) kann die Gleichung (3.2) ausgedrückt werden mit:

$$F = W = W_f + W_b + W_s + W_a \quad [N] \quad (3.3)$$

Bei der Berechnung des Energiebedarfs ist es üblich, dass eine Widerstandskraft durch die Gewichtskraft<sup>23</sup> dividiert wird, um einen dimensionslosen spezifischen Widerstand<sup>24</sup> zu erhalten. Dies dient der „[...] fahrzeugunabhängigen Charakterisierung einer Strecke [...]“ [Pachl 2013a, S. 23]. In der Gleichung (3.4) wird der spezifische Widerstand  $w^*$  auf die Masse  $m$  und in der Gleichung (3.5) wird der spezifische Widerstand  $w$  auf die Gewichtskraft  $G$  bezogen [Vgl. Filipovic 2005, S. 24].

$$w^* = \frac{W}{m} = \frac{W}{G} \cdot g = w \cdot g \quad \left[\frac{N}{t}\right] \quad (3.4)$$

$$w = \frac{W}{G} = \frac{W}{m \cdot g} = \frac{w^*}{g} \quad \left[\frac{N}{t}\right] \quad (3.5)$$

mit  $w^*$  = spezifischer Widerstand  $[N/t]$   
 $w$  = spezifischer Widerstand  $[N/kN]$   
 $G$  = Gewichtskraft  $[N]$   
 $g$  = Fallbeschleunigung  $[m/s^2]$   
 $m$  = Masse  $[t]$

<sup>23</sup> Die Gewichtskraft  $G$  berechnet sich aus dem Produkt der Masse  $m$  mit der Fallbeschleunigung  $g$ .

<sup>24</sup> Der spezifische Widerstand wird auch Widerstandszahl oder Widerstandskoeffizient genannt [Vgl. Pachl 2013a, S. 23]

Der spezifische Widerstand wird in dieser Arbeit genutzt um den benötigten Energiebedarf zu ermitteln. Zur korrekten Berechnung wird empfohlen den spezifischen Beschleunigungswiderstand  $w_a$  auf die Masse und die restlichen spezifischen Widerstände auf die Gewichtskraft zu beziehen. [Vgl. Filipovic 2005, S. 24] Dies wird in der Gleichung (3.6) berücksichtigt.

$$W = W_f + W_b + W_s + W_a = (w_f + w_b + w_s) \cdot G + w_a^* \cdot m \quad [N] \quad (3.6)$$

mit  $w_f$  = spezifischer Fahrzeugwiderstand  $[N/kN]$   
 $w_b$  = spezifischer Bogenwiderstand  $[N/kN]$   
 $w_s$  = spezifischer Neigungswiderstand  $[N/kN]$   
 $w_a^*$  = spezifischer Beschleunigungswiderstand  $[N/t]$

In Bezug auf die Gleichung (3.4) kann die Gleichung (3.6) wie folgt umgestellt werden:

$$W = W_f + W_b + W_s + W_a = (w_f + w_b + w_s + w_a) \cdot m \cdot g \quad [N] \quad (3.7)$$

mit  $w_a$  = spezifischer Beschleunigungswiderstand  $[N/kN]$

### 3.1.1.1 Neigungswiderstand

Der Neigungswiderstand  $W_s$  entspricht dem jeweiligen Streckenverlauf und wird in der Gleichung (3.8) dargestellt. Da die Neigung der Strecke sowohl positiv als auch negativ sein kann, ist folglich auch der Neigungswiderstand positiv bzw. negativ.<sup>25</sup> Der Wert für  $\alpha$  stellt dabei den Neigungswinkel dar. [Vgl. Pachl 2013a, S. 23]

$$W_s = m \cdot g \cdot \sin \alpha \quad [N] \quad (3.8)$$

mit  $\sin \alpha$  = Neigungswinkel  $[\circ]$   
 $g$  = Fallbeschleunigung  $[m/s^2]$   
 $m$  = Masse  $[t]$

Die Neigung einer Eisenbahnstrecke wird üblicherweise in Promille angegeben. Dafür wird die Variable  $i$  verwendet. Es gilt  $i = \tan \alpha$ . Da die im Eisenbahnverkehr auftretenden Längsneigungen in der Regel einen Wert von  $i = 40 \text{ ‰}$  nicht überschreiten, gilt hier die Aussage  $\sin \alpha = \tan \alpha$  [Vgl. Pachl 2013a, S. 24]. Somit gilt näherungsweise:

<sup>25</sup> Ein positiver Neigungswiderstand tritt bei einer Steigung auf und wirkt der Fahrtrichtung entgegen. Ein negativer Neigungswiderstand tritt bei einem Gefälle auf und wirkt als beschleunigende Kraft. [Vgl. Pachl 2013a, S. 24]



$$W_s \approx m \cdot g \cdot i \quad [N] \quad (3.9)$$

mit  $i$  = Neigungsverhältnis [‰]

In Verbindung mit der Gleichung (3.5) kann die Gleichung (3.9) auch wie folgt ausgedrückt werden:

$$w_s = \frac{W_s}{m \cdot g} \approx \frac{m \cdot g \cdot i}{m \cdot g} \approx i \quad [\text{‰}] \quad (3.10)$$

### 3.1.1.2 Bogenwiderstand

Die Berechnung des spezifischen Bogenwiderstands kann sehr genau erfolgen. Doch werden für eine derartige Berechnung sehr viele Parameter benötigt, die im Regelfall nicht zur Verfügung stehen. Daher existieren für die Berechnung des spezifischen Bogenwiderstands  $w_b$  zwei vereinfachte Formeln, die auf empirisch-statistischen Werten basieren. So stellt die Gleichung (3.11) die Berechnung für Bögen mit Radien  $R \leq 300 \text{ m}$  dar, während die Gleichung (3.12) die Berechnung von Bögen mit Radien von  $R > 300 \text{ m}$  ermöglicht. [Vgl. Wende 2003, S. 107 f.]

$$w_b = \frac{650}{R - 55} \quad [1] \quad (3.11)$$

$$w_b = \frac{500}{R - 30} \quad [1] \quad (3.12)$$

mit  $R$  = Bogenhalbmesser [m]

### 3.1.1.3 Fahrzeugwiderstand

Der Fahrzeugwiderstand  $W_f$ , häufig auch Laufwiderstand genannt, setzt sich aus mehreren Einzelwiderständen zusammen [Vgl. Pacht 2013a, S. 26]:

- Rollwiderstand<sup>26</sup>
- Lagerreibungswiderstand<sup>27</sup>

<sup>26</sup> Der Rollwiderstand ist das Ergebnis der elastischen Verformung an der Kontaktstelle zwischen Schiene und Rad. Wenn sich das Fahrzeug und damit das Rad bewegt, wandert die Verformungsstelle auf der Schiene in Fahrtrichtung entlang. Die dabei entstehende Walkarbeit spiegelt sich im Rollwiderstand wieder. [Vgl. Pacht 2013a, S. 26]

<sup>27</sup> Die Lagerreibungswiderstände sind abhängig von der jeweils im Schienenfahrzeug verwendeten Bauart von Achslagern. Schwingungen im Zugverband, z.B. durch angeregte Wagenkästen infolge von Unebenheiten auf der Strecke, werden mit dem dynamischen Widerstand angegeben. [Vgl. Pacht 2013a, S. 26]

- dynamischer Widerstand
- Triebwerkswiderstand<sup>28</sup>
- Luftwiderstand<sup>29</sup>

Der Fahrzeugwiderstand kann durch verschiedene Formeln berechnet werden. Eine Variation sind u.a. die bei der DB eingesetzten Formeln von Sauthoff und Strahl.<sup>30</sup> Dabei basieren alle heute verwendeten Fahrzeugwiderstandsformeln im Kern auf der Berechnung nach W. J. Davis. Die von ihm im Jahr 1926 erschaffene Formel ist vergleichsweise akkurat und wird noch heute für Widerstandsberechnungen, primär in Nordamerika, verwendet. Diese Formel kann in abgewandelter Form auch für Deutschland verwendet werden, beispielsweise bei der Berechnung des Fahrzeugwiderstands von Triebzügen [Vgl. Pacht 2013a, S. 27 f.; Vgl. Krug 2001, S. 235 f.; Schüler-Hainsch 1991, S. 10 f.]. Da aber für die originäre Davis-Gleichung mehrere Parameter bestimmt werden müssen, zu denen keine belegbaren Informationen recherchierbar waren, wird für die Berechnung des Fahrzeugwiderstands in dieser Arbeit die Fahrzeug- und Zugwiderstandsgleichung nach Wende verwendet. Dabei wird für die drei Zugkategorien SPFV, SPNV und SGV unterschieden.

Für den SPFV wird die Gleichung (3.13) verwendet. Diese beschreibt die Widerstandskraft für ICE-Hochgeschwindigkeitszüge. [Vgl. Wende 2003, S. 152]

$$W_{f(SPFV)} = W_{Z0} + W_{Z1} \cdot \frac{v}{v_{00}} + W_{Z2} \cdot \left( \frac{v + \Delta v}{v_{00}} \right)^2 \quad [N] \quad (3.13)$$

mit  $W_{Z0}$  = Grundwiderstandskraft [N]  
 $W_{Z1}$  = Linearwiderstandskonstante [N]  
 $W_{Z2}$  = Luftwiderstandskonstante [N]  
 $v$  = Geschwindigkeit [km/h]  
 $v_{00}$  = Geschwindigkeitskonstante [km/h]  
 $\Delta v$  = windbedingter Geschwindigkeitszuschlag [km/h]

<sup>28</sup> Der Reibungswiderstand der rotierenden Komponenten in den Antriebsmaschinen wird durch den Triebwerkswiderstand beschrieben. [Vgl. Pacht 2013a, S. 26]

<sup>29</sup> Der Luftwiderstand ist abhängig von der Form und der Geschwindigkeit des Fahrzeugs. [Vgl. Pacht 2013a, S. 26]

<sup>30</sup> Der Fahrzeugwiderstand nach Sauthoff wird für die Widerstandsberechnung von Personenwagen ohne Lokomotive verwendet, während die Formel von Strahl bei der Widerstandsberechnung von Güterzügen ohne Lokomotive Anwendung findet [Vgl. Schüler-Hainsch 1991, S. 11 f.].

Für die Zugkategorie SPNV kommt die Triebwagenwiderstandskraftgleichung zum Einsatz, siehe auch Gleichung (3.14). [Vgl. Wende 2003, S. 151]

$$W_{f(SPNV)} = w_{Z0} \cdot G_Z + W_{Z2} \cdot \left( \frac{v + \Delta v}{v_{00}} \right)^2 \quad [N] \quad (3.14)$$

mit  $w_{Z0}$  = Grundwiderstandszahl des Zuges [1]

$G_Z$  = Gewichtskraft des Zuges [N]

$W_{Z2}$  = Luftwiderstandskonstante [N]

Für die Zugkategorie SGV muss eine Kombination aus der Lokomotivwiderstandskraft sowie der Wagenzugwiderstandsgleichung nach Strahl verwendet werden. Die Lokomotivwiderstandskraft wird mit der Gleichung (3.15) berechnet. Der spezifische Wagenwiderstand des Wagenzuges wird mit der Gleichung (3.16) ermittelt. [Vgl. Wende 2003, S. 151 ff.]

$$W_{f(SGV)_{Lok}} = w_{L0} \cdot G_L + W_{L2} \cdot \left( \frac{v + \Delta v}{v_{00}} \right)^2 \quad [N] \quad (3.15)$$

$$W_{f(SPNV)_{Wagen}} = w_{W0} + w_{W2} \cdot \left( \frac{v}{v_{00}} \right)^2 \quad [N] \quad (3.16)$$

mit  $w_{L0}$  = Grundwiderstandszahl der Lokomotive [1]

$G_L$  = Gewichtskraft der Lokomotive [N]

$W_{L2}$  = Luftwiderstandskonstante der Lokomotive [N]

$w_{W0}$  = Grundwiderstandszahl der Wagen [1]

$w_{W2}$  = Luftwiderstandskonstante der Wagen [1]

Die zur Berechnung notwendigen Widerstandskonstanten können den Erläuterungen von Wende entnommen werden [Vgl. Wende 2003, S. 151 ff.].

#### 3.1.1.4 Beschleunigungswiderstand

„Der Beschleunigungswiderstand ist kein Widerstand im eigentlichen Sinne sondern beruht auf der Trägheit der Massen.“ [Schüler-Hainsch 1991, S. 17] Bei der Berechnung des Beschleunigungswiderstandes ist zu beachten, dass neben einer translatorischen auch eine rotatorische Trägheit existiert. Daher „[...] erhöht sich die zu berücksichtigende Zugmasse noch um die mit den Getriebeübersetzungen und Raddurchmessern umgerechneten rotatorischen Trägheitsmomente der Antriebe und Radsätze.“ [Steimel 2006, S. 31] Diesem Umstand wird durch einen fahrzeugspezifischen Zuschlagsfaktor  $\xi$  berücksichtigt,

siehe Gleichung (3.17), der in Tab. 3 für die verschiedenen Arten von Schienenfahrzeugen aufgelistet wird. [Vgl. Steimel 2006, S. 31; Vgl. Wende 2003, S. 118]

$$W_a = a \cdot m \cdot \xi \cdot 10^3 \quad [N] \quad (3.17)$$

mit  $a$  = Beschleunigung [ $m/s^2$ ]

$\xi$  = Zuschlagsfaktor für rotierende Massen [1]

**Tab. 3: Zuschlagsfaktoren für rotierende Massen**

Fahrzeugart	Zuschlagsfaktor $\xi$
Reisezugwagen	1,03 ... 1,04
Elektrische Triebwagen	1,08 ... 1,12
Elektrische Lokomotiven	1,15 ... 1,30
Mittelwert für lokbespannte Züge	1,06 ... 1,10
Güterzug leer	1,15
Güterzug beladen	1,06

Quelle: Veränderte Darstellung nach: Steimel 2006, S. 32; Biesenack et al. 2006, S. 23

Wird die Gleichung (3.5) in die Gleichung (3.17) eingesetzt, ergibt das den folgenden Ausdruck:

$$w_a = \frac{W_a}{m \cdot g} = \frac{a \cdot m \cdot \xi \cdot 10^3}{m \cdot g} = \frac{a}{g} \cdot \xi \cdot 10^3 \quad \left[ \frac{N}{kN} \right] \quad (3.18)$$

Die für die Berechnung des Beschleunigungswiderstandes notwendigen üblichen Beschleunigungswerte für Züge stellt Tab. 4 dar.

**Tab. 4: Beschleunigungswerte für verschiedene Zugarten**

Art der Züge	Beschleunigung $a$
für schwere Güterzüge	0,02 ... 0,10 $m/s^2$
für gewöhnliche Güterzüge	0,10 ... 0,20 $m/s^2$
für Reisezüge	0,30 ... 0,40 $m/s^2$
für Schnelltriebzüge im Fernverkehr	0,40 ... 0,70 $m/s^2$

Quelle: Veränderte Darstellung nach: Steimel 2006, S. 32

### 3.1.2 Ausgangsgröße: Zugkraft

„Beim Einwirken einer Kraft  $F$  auf eine Masse  $m$  in Richtung eines Weges  $s$  (parallel zur Erdoberfläche) werden Widerstände  $W$  wirksam, die der Ortsveränderung entgegen wirken.“ [Schmidt 1988, S. 45]

Damit ein Schienenfahrzeug diese Widerstände überwinden kann, muss es eine Zugkraft entwickeln. Die Zugkraft eines Schienenfahrzeuges ist abhängig u.a. von der Bauart des Triebfahrzeugs, der Geschwindigkeit und dem Kraftschluss zwischen Rad und Schiene [Vgl. Schüler-Hainsch 1991, S. 17]. Eine Aussage aus diesem Sachverhalt ist, dass die maximal übertragbare Zugkraft durch zwei Grenzkkräfte bestimmt wird. Die erste Grenzkraft ist die Kraft die durch Rad und Schienen übertragen werden kann. [Vgl. Pacht 2013a, S 22] Diese Aussage gibt die Gleichung (3.19) wieder. Dabei spielt neben der Adhäsionsmasse  $m_r$ <sup>31</sup> der Haftreibungsbeiwert, dargestellt durch den Kennwert  $\mu$ , eine wichtige Rolle. Der Haftreibungsbeiwert gibt an, wie hoch die Reibung zwischen Rad und Schiene ist. Je höher die Reibung, desto mehr Kraft kann zwischen Rad und Schiene übertragen werden. Der Haftreibungsbeiwert ist abhängig u.a. vom Material, der Beschaffenheit und dem Zustand der Berührungsflächen, von der Fahrtgeschwindigkeit und den Eigenschaften des Triebfahrzeugs. [Vgl. Filipovic 2005, S. 32 ff.]

$$F_Z = m_r \cdot g \cdot \mu \quad [kN] \quad (3.19)$$

mit  $F_Z$  = Zugkraft [N]

$m_r$  = Adhäsionsmasse [t]

$g$  = Fallbeschleunigung [ $m/s^2$ ]

$\mu$  = Haftreibwert (Adhäsionskoeffizient) [1]

Je nach Größe des Haftreibungsbeiwertes kann eine Differenz zwischen der Fahrgeschwindigkeit des Fahrzeugs und der Umfangsgeschwindigkeit des Rades auftreten. Dieses Phänomen wird als Schlupf bezeichnet. [Vgl. Filipovic 2005, S. 36] Da sich diese Thematik mitunter als sehr komplex erweisen kann, wird dieser Aspekt in der Arbeit nicht berücksichtigt. Bei der Ermittlung der Leistung wird, wenn es keine anderen Angaben gibt, von mittleren Adhäsions-

<sup>31</sup> Die Adhäsionsmasse, auch Reibungsmasse genannt, beschreibt das Gewicht, mit dem die angetriebenen Achsen auf die Schienen einwirken [Vgl. Hecht et al. 2008, S. 438].

verhältnissen bei einer mittleren Geschwindigkeit ausgegangen, somit gilt  $\mu = 0,2$  [Vgl. Filipovic 2005, S. 34]. Dieser Wert wird auch von anderen Autoren vertreten [Vgl. Wende 2003, S. 15].

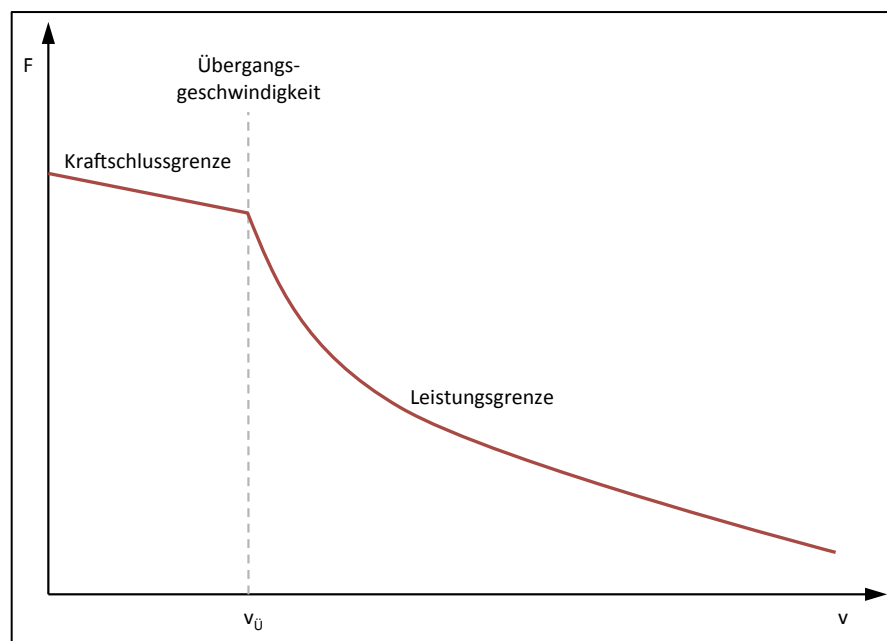
Die durch die Antriebsleistung begrenzte maximale Zugkraft eines Schienenfahrzeugs ist die zweite Grenzkraft [Vgl. Pacht 2013a, S. 22]. Sie wird durch die Gleichung (3.20) angegeben. In Worten ausgedrückt ist die Zugkraft abhängig von der Leistung  $P$  und der aktuellen Geschwindigkeit  $v$ .

$$F = \frac{P}{v} \quad [N] \quad (3.20)$$

mit  $F$  = Kraft [N]  
 $P$  = Leistung [W]  
 $v$  = Geschwindigkeit [km/h]

Betrachtet man nun die Linienverläufe der beiden Grenzwerte ergibt dies die Leistungsgrenzen eines Schienenfahrzeugs (siehe auch Abb. 7).

**Abb. 7: Verlauf der Leistungsgrenzen eines Schienenfahrzeugs**



Quelle: Veränderte Darstellung nach: Pacht 2013a, S. 23

### 3.1.3 Streckenbelastung und Transportarbeit

Der Beförderungs- bzw. Transportprozess<sup>32</sup> einer Eisenbahn muss mit Wagen durchgeführt werden, die wiederum eine Eigenmasse besitzen. Zusätzlich zum Eigengewicht muss auch das Gewicht der transportierten Einheiten betrachtet werden. Die dafür verwendete Einheit Bruttotonne (*Bt*) betrachtet dabei das Leergewicht eines Zuges, das kann ein Triebzug oder auch eine Lokomotive mit angehängten Wagen sein, zusätzlich der Zuladung an Personen bzw. Gütern. [Vgl. Schmidt 1988, S. 46]

Unter dem Begriff der Streckenbelastung wird das Gesamtgewicht verstanden, welches während eines definierten Zeitabschnittes bewegt wird. Das Gesamtgewicht ermittelt sich dabei aus der Anzahl der Züge mal des jeweiligen Bruttogewichts der Zugart. Dies muss für beide Richtungen des Streckenabschnitts durchgeführt werden. Die dafür genutzte Einheit wird als Lasttonne (*Lt*) bezeichnet. [Vgl. Schmidt 1988, S. 46] Für die Streckenbelastung innerhalb eines Bezugszeitraums  $T$  kann folgende Gleichung verwendet werden.

$$T_T = \sum_{j=1}^{n_{zk}} n_{z_j} \cdot m_{Bt_j} \quad [t] \quad (3.21)$$

mit  $T_T$  = Streckenbelastung während der Zeit  $T$  [ $t$ ]  
 $n_{zk}$  = Anzahl der verschiedenen Zugkategorien [ $1$ ]  
 $n_{z_j}$  = Anzahl der Züge einer Zugkategorie  $j$  während der Zeitspanne  $T$  [ $1$ ]  
 $m_{Bt_j}$  = Bruttogewicht eines Zuges einer Zugkategorie [ $t$ ]

Für die Energiebedarfsermittlung ist es notwendig, die gesamte Transportarbeit zu ermitteln. Die Transportarbeit berechnet sich dabei aus der Transportweite  $L$  und der Streckenbelastung  $T_T$ . Sie wird folglich in Lasttonnenkilometer angegeben. [Vgl. Schmidt 1988, S. 47]

$$A_{TT} = T_T \cdot L \quad [tkm] \quad (3.22)$$

mit  $A_{TT}$  = Transportarbeit während der Zeit  $T$  [ $tkm$ ]  
 $L$  = Transportweite [ $km$ ]

<sup>32</sup> Um die Lesbarkeit nicht unnötig zu verschlechtern wird im weiteren Verlauf der Masterarbeit sowohl für den Transport von Gütern als auch für die Beförderung von Personen der Begriff des *Transports* bzw. *transportieren* verwendet.

### 3.1.4 Energiebedarfsermittlung nach Kother

Für die Fernbahnen wurde von Kother ein Berechnungsalgorithmus entwickelt, mit dem ein recht genauer Energiebedarf ermittelt werden kann. Die für die Energiebedarfsermittlung notwendigen Ausgangsgrößen sind die spezifischen Widerstände. Darauf aufbauend kann der spezifische Energiebedarf ermittelt werden, „[...] der für das Fahren eines Zuges zwischen den Treibrädern des Schienenfahrzeugs und den Schienen umgesetzt werden muss [...]“ [Schmidt 1988, S. 48] Ist der Wirkungsgrad der Fahrmotoren eines Schienenfahrzeugs bekannt, kann damit der Energiebedarf am Stromabnehmer des Schienenfahrzeugs berechnet werden. [Vgl. Schmidt 1988, S. 47 f.]

Im Kern besteht die Energiebedarfsermittlung nach Kother aus der Aussage, dass der spezifische Energiebedarf  $e$  zum spezifischen Widerstand  $w$  „[...] direkt proportional ist“. [Schmidt 1988, S. 48] Steigt also der spezifische Widerstand, steigt folglich auch der spezifische Energiebedarf. Diese Aussage wird durch die Gleichung (3.23) wiedergegeben.

$$e \sim w \quad \text{oder auch} \quad e = c \cdot w \quad \left[ \frac{Wh}{tkm} \right] \quad (3.23)$$

mit  $e$  = spezifischer Energiebedarf  $[Wh/tkm]$   
 $w$  = spezifischer Widerstand  $[N/kN]$   
 $c$  = Proportionalitätsfaktor  $[1]$

Über eine Zahlenwertgleichung kann der Zahlenwert bzw. der Proportionalitätsfaktor  $c$  ermittelt werden. Es ist dabei zu beachten, in welcher Einheit der spezifische Energiebedarf dargestellt werden soll. Es ist sowohl eine Angabe in  $kJ/tkm$  als auch in  $Wh/tkm$  möglich. [Vgl. Schmidt 1988, S. 48] In dieser Arbeit wird konsequent die Einheit  $Wh/tkm$  verwendet, da diese geläufiger und bei der späteren Berechnung der Energiepreise auch sinnvoller ist. In Folge dessen wird die Gleichung (3.24) wie folgt aufgestellt:

$$e = w \left[ \frac{N \cdot 9,81 \, kN \cdot Ws \cdot 1000 \, m \cdot h}{kN \cdot t \cdot Nm \cdot km \cdot 3600 \, s} \right] \quad \left[ \frac{Wh}{tkm} \right] \quad (3.24)$$



Eine Vereinfachung der Gleichung (3.24) führt zum Ausdruck:

$$e = 2,725 \cdot w \quad \left[ \frac{Wh}{tkm} \right] \quad (3.25)$$

### 3.1.4.1 Spezifischer Energiebedarf für eine Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit

Bei der Energiebedarfsermittlung nach Kother wird davon ausgegangen, dass sich die Streckenbelastung auf beide Richtungen der Strecke gleichmäßig verteilen. Die Berechnung selbst erfolgt für jede Richtung einzeln. [Vgl. Biesenack et al. 2006, S. 21] Dies liegt in dem Umstand begründet, dass der spezifische Streckenwiderstand, bestehend aus dem spezifischem Bogen- und dem spezifischem Neigungswiderstand, für jede Richtung einen anderen Wert annehmen kann. Die Berechnung des spezifischen Energiebedarfs  $e_f$  für eine Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit kann der Gleichung (3.26) entnommen werden. [Vgl. Biesenack et al. 2006, S. 21 f.; Vgl. Schmidt 1988, S. 49]

$$e_f = \frac{e_{f1} + e_{f2}}{2} \quad \left[ \frac{Wh}{tkm} \right] \quad (3.26)$$

mit  $e_f$  = spezifischer Energiebedarf Beharrung [ $Wh/tkm$ ]  
 $e_{f1}$  = spezifischer Energiebedarf Beharrung in Richtung 1 [ $Wh/tkm$ ]  
 $e_{f2}$  = spezifischer Energiebedarf Beharrung in Richtung 2 [ $Wh/tkm$ ]

In Bezug zur Gleichung (3.23) kann die Berechnung von  $e_{f1}$  wie folgt dargestellt werden, siehe Gleichung (3.27). Die Rechnung für die Gegenrichtung  $e_{f2}$  wird analog ausgeführt. [Vgl. Biesenack et al. 2006, S. 21 f.; Vgl. Schmidt 1988, S. 48 f.]

$$e_{f1} = c \cdot (w_b \pm w_s + w_f) \quad \left[ \frac{Wh}{tkm} \right] \quad (3.27)$$

mit  $w_b$  = spezifischer Bogenwiderstand [ $N/kN$ ]  
 $w_s$  = spezifischer Neigungswiderstand [ $N/kN$ ]  
 $w_f$  = spezifischer Fahrzeugwiderstand [ $N/kN$ ]

Welchen Wert der spezifische Neigungswiderstand annimmt, hängt davon ab, ob das Schienenfahrzeug eine Neigung hinauf, dann besitzt  $w_s$  einen positiven Wert, oder hinab fahren muss, folglich ist  $w_s$  negativ. Ein Sonderfall wäre der Umstand, dass gebremst werden muss, um die Geschwindigkeit zu halten. In

diesem Fall wäre der spezifische Energiebedarf  $e_{f1}$  gleich Null. [Vgl. Biesenack et al. 2006, S. 21; Vgl. Schmidt 1988, S. 48 f.]

### 3.1.4.2 Spezifischer Energiebedarf für eine Fahrt mit Beschleunigung

Die allgemeine Berechnung der Beschleunigungsarbeit, die ein Schienenfahrzeug leisten muss, um den Zug von einer Anfangsgeschwindigkeit  $v_1$  auf eine Endgeschwindigkeit  $v_2$  zu bringen, wird in der Gleichung (3.28) dargestellt. Mit dem Massenfaktor  $\xi$  wird zusätzlich die Beschleunigung der rotierenden Massen berücksichtigt, siehe Gleichung (3.29) [Vgl. Biesenack et al. 2006, S. 22; Vgl. Schmidt 1988, S. 49].

$$E_b = \int_{s_0}^{s_1} F \cdot ds = m \cdot \int_{v_0}^{v_1} v \cdot dv = \frac{m}{2} \cdot (v_2^2 - v_1^2) \quad [J] \quad (3.28)$$

$$E_b = \frac{m}{2} \cdot \xi \cdot (v_2^2 - v_1^2) \quad [J] \quad (3.29)$$

mit  $E_b$  = absoluter Energiebedarf für Beschleunigung [Wh]

$F$  = Kraft [N]

$m$  = Masse [t]

$v_1$  = Anfangsgeschwindigkeit [km/h]

$v_2$  = Endgeschwindigkeit [km/h]

$\xi$  = Zuschlagsfaktor für rotierende Massen [1]

Da vor allem der spezifische Energiebedarf  $e_b$  von Interesse ist, muss die Beschleunigungsarbeit  $E_b$  auf die Transportarbeit  $A_T$  bezogen werden [Vgl. Biesenack et al. 2006, S. 22; Vgl. Schmidt 1988, S. 49]. Die Transportarbeit wurde bereits in der Gleichung (3.22) in Kombination mit der Gleichung (3.21) beschrieben. Da es sich hier um die Betrachtung eines Zuges handelt, vereinfacht sich die Gleichung wie folgt:

$$A_T = m \cdot l_a \quad [tkm] \quad (3.30)$$

mit  $A_T$  = Transportarbeit [tkm]

$l_a$  = Beschleunigungsweg [m]

Wird die Gleichung (3.30) in die Gleichung (3.29) eingesetzt und umgestellt ergibt dies folgenden Ausdruck:

$$e_b = \frac{E_b}{m \cdot l_a} = \frac{\xi}{2 \cdot l_a} \cdot (v_2^2 - v_1^2) \quad \left[ \frac{J}{tkm} \right] \quad (3.31)$$

mit  $e_b$  = spezifischer Energiebedarf Beschleunigung [Wh/tkm]

Zur besseren Übersicht und für die daraus resultierende bessere Lesbarkeit während der Durchführung der anschließenden Zahlenwertgleichung, wird der Ausdruck der Gleichung (3.31) mit dem Buchstaben  $z$  substituiert, siehe Gleichung (3.32).

$$\frac{\xi}{2 \cdot l_a} \cdot (v_2^2 - v_1^2) = z \quad \left[ \frac{J}{tkm} \right] \quad (3.32)$$

Da der spezifische Energiebedarf für eine Beschleunigung ebenfalls in der Einheit  $Wh/tkm$  angegeben werden soll, muss die Zahlenwertgleichung wie folgt dargestellt werden [Vgl. Biesenack et al 2006, S. 23; Vgl. Schmidt 1988, S. 49]:

$$e_b = z \cdot \left[ \frac{1}{2} \frac{km^2}{km} \frac{h^2}{h^2} \frac{(1000 m)^2}{(3600 s)^2} \frac{Ws}{km^2} \frac{h}{Nm} \frac{Ns^2}{3600 s \cdot kg \cdot m} \frac{1000 kg}{t} \right] \quad \left[ \frac{Wh}{tkm} \right] \quad (3.33)$$

Eine Vereinfachung der Gleichung (3.33) führt zu folgender Gleichung:

$$e_b = 0,0107 \cdot z \quad \left[ \frac{Wh}{tkm} \right] \quad (3.34)$$

Wird die Substitution aus der Gleichung (3.32) rückgängig gemacht, ergibt dies in Zusammenhang mit der Zahlenwertgleichung folgenden Ausdruck:

$$e_b = 0,0107 \cdot \frac{\xi}{l_a} \cdot (v_2^2 - v_1^2) \quad \left[ \frac{Wh}{tkm} \right] \quad (3.35)$$

Da, wie bei der Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit, der spezifische Energiebedarf für beide Richtungen ermittelt werden muss, ist das Ergebnis wieder der Mittelwert aus den beiden Richtungen [Vgl. Biesenack et al. 2006, S. 23].

$$e_b = \frac{e_{b1} + e_{b2}}{2} \quad \left[ \frac{Wh}{tkm} \right] \quad (3.36)$$

mit  $e_{b1}$  = spezifischer Energiebedarf Beschleunigung für Richtung 1  $[Wh/tkm]$   
 $e_{b2}$  = spezifischer Energiebedarf Beschleunigung für Richtung 2  $[Wh/tkm]$

### 3.1.4.3 Spezifischer Energiebedarf für Nebenverbraucher

Neben dem spezifischen Energiebedarf für Beschleunigung und Beharrung existiert auch ein spezifischer Energiebedarf für Hilfsprozesse und Nebenverbraucher, wie beispielsweise Kompressoren oder auch Lüfter auf den Fahrzeugen [Vgl. Biesenack et al. 2006, S. 23]. Durch betriebsstatistische Untersuchungen konnte dabei ein Faktor ermittelt werden, der mit der Summe aus dem spezifischen Energiebedarf für die Beschleunigung und der Beharrung multipliziert wird, siehe Gleichung (3.37). [Vgl. Schmidt 1988, S. 50]

$$e_n = 0,06 \cdot (e_f + e_b) \quad \left[ \frac{Wh}{tkm} \right] \quad (3.37)$$

mit  $e_n$  = spezifischer Energiebedarf Nebenverbraucher  $[Wh/tkm]$

### 3.1.4.4 Spezifischer Energiebedarf für Heizung und Klimatisierung

Für die Leistung der Klimaanlage sowie der Heiztechnik kann ein pauschaler Mittelwert von  $e_h = 4 Wh/tkm$  angenommen werden. Für Güterzüge entfällt dieser Wert. [Vgl. Biesenack et al. 2006, S. 23 f.]

### 3.1.4.5 Spezifischer Energiebedarf ab Stromabnehmer

Der spezifische Energiebedarf eines Zuges am Stromabnehmer berechnet sich nach der Gleichung (3.38) [Vgl. Biesenack et al. 2006, S. 23 f.; Vgl. Schmidt 1988, S. 50].

$$e_{str} = \frac{e_f + e_b}{\eta_{Fzg}} + e_n + e_h = \frac{e_{mech}}{\eta_{Fzg}} + e_n + e_h \quad \left[ \frac{Wh}{tkm} \right] \quad (3.38)$$

mit  $e_{str}$  = spezifischer Energiebedarf ab Stromabnehmer  $[Wh/tkm]$

$e_h$  = spezifischer Energiebedarf Heizung/Klimatisierung  $[Wh/tkm]$

$\eta_{Fzg}$  = Wirkungsgrad Fahrmotors [%]

$e_{mech}$  = spezifischer Energiebedarf Mechanik  $[Wh/tkm]$

### 3.1.4.6 Spezifischer Energiebedarf ab Unterwerk

Da auch der Fahrdrabt einen geringen Widerstand aufweist, muss der spezifische Energiebedarf ab dem Stromabnehmer  $e_{str}$  durch den Wirkungsgrad der Fahrleitung dividiert werden, siehe Gleichung (3.39) [Vgl. Biesenack et al. 2006, S. 24; Vgl. Schmidt 1988, S. 50 f.].

$$e_{UW} = \frac{e_{Str}}{\eta_{FL}} \quad \left[ \frac{Wh}{tkm} \right] \quad (3.39)$$

mit  $e_{UW}$  = spezifischer Energiebedarf ab Unterwerk [Wh/tkm]  
 $\eta_{FL}$  = Wirkungsgrad Fahrleitung [%]

Die Berechnung von  $e_{UW}$  gestaltet sich dabei genauso einfach wie die Berechnung von  $e_{Str}$ . Der Wirkungsgrad der Fahrleitung ist unabhängig von den infrastrukturellen Gegebenheiten des jeweiligen Abschnitts oder der Zugkategorie und wird fortwährend mit 97 % angegeben [Vgl. Biesenack et al. 2006, S. 24].

### 3.1.4.7 Absoluter Energiebedarf ab Unterwerk

Die Berechnung des absoluten Energiebedarfs  $E_{UW}$  einer Strecke ergibt sich aus der Addition der einzelnen absoluten Energiebedarfe je Zugkategorie und je Abschnitt. In der Gleichung (3.40) ist die Variable  $s$  die Anzahl der Zugkategorien und  $k$  die Anzahl der Streckenabschnitte.

$$E_{UW} = \sum_{j=1}^s \sum_{i=1}^k E_{UW_{Z_{ji}}} \quad [Wh] \quad (3.40)$$

mit  $E_{UW}$  = absoluter Energiebedarf ab Unterwerk [in Wh]  
 $E_{UW_{Z_i}}$  = absoluter Energiebedarf ab Unterwerk je Zugkategorie und Streckenanzahl [in Wh]

Der einzelne absolute Energiebedarf je Zugart  $E_{UW_Z}$  wiederum berechnet sich nach der Gleichung (3.41). Sie stellt beispielhaft die Berechnung des absoluten Energiebedarfs einer Zugkategorie über alle Abschnitte dar.

$$E_{UW_Z} = \sum_{i=1}^k e_{UW_{Z_i}} \cdot A_{T_{Z_i}} = \sum_{i=1}^k e_{UW_{Z_i}} \cdot T_{Z_i} \cdot L_{A_i} \quad [Wh] \quad (3.41)$$

mit  $E_{UW_Z}$  = absoluter Energiebedarf ab Unterwerk einer Zugkategorie [Wh]  
 $e_{UW_{Z_i}}$  = spez. Energiebedarf ab Unterwerk einer Zugkategorie im Abschnitt  $i$  [Wh/tkm]  
 $A_{T_{Z_i}}$  = Transportarbeit je Zugkategorie im Abschnitt  $i$  [tkm]  
 $T_{Z_i}$  = Streckenbelastung je Zugkategorie im Abschnitt  $i$  [t]  
 $L_{A_i}$  = Länge des Abschnitts  $i$  [km]

Um den absoluten Energiebedarf je Zugkategorie berechnen zu können, muss neben dem spezifischen Energiebedarf auch die Transportarbeit des jeweiligen Zuges bekannt sein [Vgl. Biesenack et al. 2006, S. 24; Vgl. Schmidt 1988, S. 51]. Die Transportarbeit wird in der Gleichung (3.22) dargestellt. Sie setzt sich aus

der Multiplikation der Streckenbelastung mit der Abschnittslänge zusammen. Die Streckenbelastung wird mit der Gleichung (3.21) beschrieben.

### 3.2 Verifikation der Energiebedarfsberechnung nach Kother

Um zu überprüfen, ob die Berechnungsmethodik aus den vorangegangenen Kapiteln korrekt ist, soll die Methodik nun verifiziert werden.

Dafür wurde eine 80 km lange Beispielstrecke erstellt. Bei deren Gestaltung wurde darauf geachtet, durchschnittliche Werte zu verwenden, um eine möglichst allgemeingültige und vergleichbare Strecke nutzen zu können. Die Strecke unterteilt sich dabei in insgesamt zehn Abschnitte zu je acht Kilometern Länge<sup>33</sup>, sowie verschiedenen Streckenhöchstgeschwindigkeiten  $[v]$ , Neigungen  $[i]$ <sup>34</sup> und Bögen  $[R]$ . Die Länge  $[L_A]$  der einzelnen Abschnitte ist durchweg konstant. Die einzelnen Werte für jeden Abschnitt können der Tab. 5 entnommen werden.

**Tab. 5: Streckenparameter der Beispielstrecke**

Strecken- parameter	Abschnitt				
	1	2	3	4	5
$v$ [km/h]	120	120	230	230	230
$i$ [‰]	3	5	1	-1	-2
$R$ [m]	500	1.500	1.500	2.500	0
$L_A$ [km]	8	8	8	8	8
	6	7	8	9	10
$v$ [km/h]	230	230	230	230	230
$i$ [‰]	0	1	0	-1	0
$R$ [m]	2.500	2.500	0	2.500	2.500
$L_A$ [km]	8	8	8	8	8

Quelle: Eigene Darstellung

<sup>33</sup> Für eine Nahverkehrsstrecke ist ein Haltstellenabstand von um die 8 km durchaus typisch [Vgl. Nick 2002, S. 76].

<sup>34</sup> Die Angaben bzgl. der Streckenneigungen für die Verifikationsstrecke stellen die mittlere Längsneigung des Abschnitts dar [Vgl. Wende 2003, S. 93].

### 3.2.1 Fahrzeugspezifische Parameter

Für jede der drei verwendeten Zugkategorien wird je ein spezifischer Beispielzug verwendet. Die Tab. 6 gibt einen Überblick über alle in dieser Arbeit notwendigen technischen Parameter der Beispielzüge.

**Tab. 6: Parameter der Beispielzüge**

technische Daten	SPFV	SPNV	SGV
max. Betriebsgeschwindigkeit	230 km/h	120 km/h	100 km/h
Beschleunigung	0,50 m/s <sup>2</sup>	0,50 m/s <sup>2</sup>	0,15 m/s <sup>2</sup>
Verzögerung	1,0 m/s <sup>2</sup>	0,56 m/s <sup>2</sup>	0,40 m/s <sup>2</sup>
Zuglänge <sup>35</sup>	200 m	105 m	550 m
Sitzplätze	444	428	–
Leergewicht	454 t	206 t	–
Ø-Bruttogewicht	471 t	214 t	1.600 t
Massenfaktor	1,10	1,10	1,06
Traktionsleistung	8 MW	3 MW	4,2 MW
Anfahrzugkraft	300 kN	200 kN	300 kN
Fahrzeugwiderstand <sup>36</sup>	8,24 N/kN	4,13 N/kN	7,42 N/kN
Wirkungsgrad Fahrmotor	80 %	80 %	82,5 %

Quelle: Eigene Darstellung nach: Siemens o.J.; Stadler o.J.; Middendorf/Müller 1999, S. 358; Biesenack et al. 2006, S. 24; Schach/Jehle/Naumann 2006, S. 156; Wende 2003, S. 71

Als Referenz für die Kategorie SPFV wird der Hochgeschwindigkeitszug „Velaro D“ der Firma Siemens verwendet. Dieser seit 2013 in Deutschland zugelassene Hochgeschwindigkeitszug kann 444 Personen bei maximal 320 km/h befördern [Vgl. Siemens o.J.].

<sup>35</sup> Die Längenangabe für den SPFV und den SPNV bezieht sich auf einen 8-teiligen bzw. einen 4-teiligen Zug. Die Längenangabe für die Zugkategorie SGV bezieht sich auf folgende Rechnung: Bei einer Bruttomasse von 1.600 t, abzüglich der Masse für die Lokomotive und einer maximalen Beladung von 60 t pro Wagen, besteht der Güterzug aus rund 26 Güterwagen. Bei einer Wagenlänge über Puffer von 19,9 m, das entspricht der Länge eines Flachwagen in Regelbauart, ergibt dies eine Gesamtwagenlänge von 517,4 m. Zuzüglich der Länge der Lokomotive von 18,9 m, ergibt dies eine Gesamtzuglänge von 536,3 m. Zur einfacheren Berechnung wurde der Wert auf 550 m aufgerundet.

<sup>36</sup> Der Fahrzeugwiderstand gilt für die Geschwindigkeit  $v = 230$  km/h beim SPFV,  $v = 120$  km/h beim SPNV sowie  $v = 100$  km/h beim SGV.

In Kategorie SPNV dient als Beispielzug der Doppelstocktriebzug „KISS“ der Firma Stadler in der Ausführung für die Ostdeutsche Eisenbahn GmbH. Bei einer Höchstgeschwindigkeit von 160 km/h kann dieser 428 Personen befördern.

Für die Kategorie SGV wird ein durchschnittlicher Güterzug verwendet, der von einer Lokomotive der Baureihe 185 gezogen wird.

Die benötigten Daten zu den Zügen wurden, soweit möglich, aus den Broschüren der Hersteller entnommen. Fehlende Parameter wurden berechnet, die entsprechenden Berechnungsschritte werden in den Kapiteln 3.2.1.1 bis 3.2.1.5 beschrieben.

### 3.2.1.1 Bruttogewicht

Ist das durchschnittliche Bruttogewicht eines Zuges nicht recherchierbar, kann dieses in zwei Schritten berechnet werden. Der erste Schritt besteht aus der Ermittlung des zusätzlichen Gewichts, welches durch die Passagiere verursacht wird. Dazu wird der durchschnittliche Besetzungsgrad im SPFV mit dem durchschnittlichen Gewicht eines Fahrgastes multipliziert. Dieses Produkt wird im zweiten Schritt mit dem Leergewicht addiert, siehe Gleichung (3.42).

$$m_{Bt} = (n_p \cdot BG_Z \cdot m_p) + m_{Lg} \quad [t] \quad (3.42)$$

mit  $m_{Bt}$  = durchschnittliches Bruttogewicht eines Zuges [t]

$n_p$  = Anzahl der Sitzplätze in einem Zug [1]

$BG_Z$  = Besetzungsgrad eines Zuges [%]

$m_p$  = durchschnittliche Masse einer Person [t]

$m_{Lg}$  = Leergewicht eines Zuges [t]

### Zugkategorie SPFV

Im deutschen Fernverkehr betrug die Auslastungsquote im Jahr 2013 rund 49 % [Vgl. DB 2014b, S. 30]. Um den Rechenaufwand nicht unnötig zu erhöhen wird im weiteren Verlauf mit einem Auslastungsgrad von 50 % gerechnet. Folglich sind in einem Velaro D im Schnitt 222 Sitze mit Personen besetzt, welche ein durchschnittliches Körpergewicht von rund 76 kg aufweisen [Vgl. Destatis 2014, S. 8]. Das Produkt aus der Anzahl der besetzten Sitze mit dem durchschnittlichen Körpergewicht beträgt rund 17 t. Dieser Wert wird anschließend



mit dem Leergewicht von 454 t addiert. Das Bruttogewicht eines Velaro D beträgt damit rund 471 t.

$$\text{SPFV} \quad m_{Bt_{SPFV}} = (444 \cdot 50\% \cdot 0,076 \text{ t}) + 454 \text{ t} \approx 471 \text{ t} \quad (3.43)$$

### Zugkategorie SPNV

Die Berechnung des Bruttogewichts für den KISS findet analog zum Berechnungsverfahren in der Kategorie SPFV statt. Auch hier wird zum Leergewicht des Triebzuges das Gewicht der Passagiere hinzuaddiert, siehe Gleichung (3.42). Im SPNV betrug die Auslastung im Jahr 2012 rund 25 % [Vgl. Destatis 2013b]. Folglich sind 107 Plätze im KISS belegt. In Multiplikation mit dem durchschnittlichen Körpergewicht ergibt dies eine Zuladung von rund 8 t [Vgl. Destatis 2014, S. 8]. Wird diese Zuladung zum Leergewicht von rund 206 t hinzu addiert, ergibt dies ein Bruttogewicht von rund 214 t [Vgl. Stadler o.J.].

$$\text{SPNV} \quad m_{Bt_{SPNV}} = (428 \cdot 25\% \cdot 0,076 \text{ t}) + 206 \text{ t} \approx 214 \text{ t} \quad (3.44)$$

### Zugkategorie SGV

Das durchschnittliche Bruttogewicht eines Güterzuges berechnet sich deutlich komplexer, da Güterzüge i.d.R. mit unterschiedlichen Wagenkonfigurationen und Beladungszuständen verkehren. Daher wird für das durchschnittliche Bruttogewicht eines Güterzuges der pauschale Wert von  $m_{Bt_{SGV}} = 1.600 \text{ t}$  verwendet [Vgl. FIS 2013; Vgl. Eickmann et al. 2008, S. 16].

#### **3.2.1.2 Beschleunigung**

In dieser Arbeit wird von einer gleichmäßigen beschleunigten Bewegung ausgegangen. Die Berechnung der Beschleunigung ergibt sich aus der Umstellung des zweiten newtonschen Gesetzes, wie in der Gleichung (3.45) dargestellt. Die dafür verwendete Masse ist das Bruttogewicht des Zuges, siehe Gleichung (3.42).

$$a = \frac{F_Z}{m_{Bt}} \quad \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] \quad (3.45)$$

mit  $a$  = Beschleunigung [ $\text{m/s}^2$ ]  
 $F_Z$  = Zugkraft [ $\text{N}$ ]

### Zugkategorie SPFV

Für den Velaro D konnten keine Beschleunigungswerte recherchiert werden. Um die theoretische Beschleunigung zu ermitteln, muss die Anfahrzugkraft durch das Bruttogewicht des Zuges dividiert werden, siehe Gleichung (3.45). Dazu wird eine Anfahrzugkraft von 300 kN [Vgl. Rötz 2014, S. 9] sowie das ermittelte Gewicht aus der Gleichung (3.43) verwendet.

$$\text{SPFV} \quad a = \frac{F_{Z_{\text{SPFV}}}}{m_{Bt_{\text{SPFV}}}} = \frac{300 \text{ kN}}{471 \text{ t}} = 0,64 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad (3.46)$$

Dieser Wert entspricht ungefähr dem Wert, der in der Literatur als Anfahrbeschleunigung genannt wird [Vgl. Wende 2003, S. 71]. Da dieser Beschleunigungswert aber nur bis zum Leistungseckpunkt des Velaro D sowie unter optimaler Ausnutzung der Haftreibung gilt, wird ein reduzierter mittlerer Beschleunigungswert von  $a = 0,50 \text{ m/s}^2$  für eine Beschleunigung bis zur Maximalgeschwindigkeit verwendet. Dieser Wert stellt die Mitte vom Bereich der in Tab. 4 für Schnelltriebzüge im Fernverkehr angegebenen Beschleunigungswerte dar. Zudem wurde in der Literatur ein ähnlicher Wert ermittelt [Vgl. Schach/Jehle/Naumann 2006, S. 156].

### Zugkategorie SPNV

Für die Zugkategorie SPNV gilt die Berechnung der Beschleunigung analog zur Zugkategorie SPFV. Die Anfahrzugkraft wird herstellerseitig mit 200 kN angegeben [Vgl. Stadler o.J.]. Das Bruttogewicht ergibt sich aus der Gleichung (3.44).

$$\text{SPNV} \quad a = \frac{F_{Z_{\text{SPNV}}}}{m_{Bt_{\text{SPNV}}}} = \frac{200 \text{ kN}}{214 \text{ t}} = 0,93 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad (3.47)$$

Das Ergebnis aus Gleichung (3.47) erscheint sehr hoch, zumal der Hersteller einen Beschleunigungswert von  $a = 0,63 \text{ m/s}^2$  für bis zu 80 km/h angibt [Vgl. Stadler o.J.]. Der berechnete Wert erscheint daher als ideeller und eher theoretischer Wert. Da es sich ebenfalls um einen Triebwagen handelt, wird

analog zur Zugkategorie SPfV wieder ein mittlerer Beschleunigungswert von  $a = 0,50 \text{ m/s}^2$ , wie er in Tab. 4 angegeben wird, verwendet.

### Zugkategorie SGV

In dieser Zugkategorie wird als Beispiel die Traxx F140 AC1 der Firma Bombardier verwendet, da diese Elektrolokomotive in Deutschland sehr weit verbreitet ist [Vgl. DB Schenker o.J.]. Diese bei der DB unter der Bezeichnung Baureihe 185 verwendete Lokomotive besitzt eine Anfahrzugkraft von 300 kN und eine Dauerleistung von 4,2 MW. [Vgl. Middendorf/Müller 1999, S. 358]

$$\text{SGV} \quad a = \frac{F_{ZSGV}}{m_{BtSGV}} = \frac{300 \text{ kN}}{1.600 \text{ t}} = 0,188 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad (3.48)$$

Das Ergebnis der Gleichung (3.48) weist einen Wert auf, der in Tab. 4 im Bereich für gewöhnliche Güterzüge liegt. Zur einfacheren Rechnung wird für die Energiebedarfsermittlung mit einer Beschleunigung von  $0,15 \text{ m/s}^2$  gerechnet. Auch hier wird als Bezugswert auf die Angaben in Tab. 4 verwiesen.

#### **3.2.1.3 Beschleunigungsweg**

Der Beschleunigungsweg kann über eine Umstellung der Weg-Zeit-Gleichung berechnet werden, siehe Gleichung (3.49).

$$l_a = \frac{a}{2} \cdot t^2 + v_1 \cdot t \quad [m] \quad (3.49)$$

mit  $l_a$  = Beschleunigungsweg [m]

$t$  = Zeit [s]

$v_1$  = Anfangsgeschwindigkeit [km/h]

Findet eine Beschleunigung aus dem Stand heraus statt, vereinfacht sich die Gleichung (3.49) wie folgt:

$$l_a = \frac{a}{2} \cdot t^2 \quad [m] \quad (3.50)$$

Zur Berechnung des Beschleunigungsweges müssen zwei weitere Parameter bekannt sein. Zum einen der Wert für die Beschleunigung und zum anderen die Zeit für den Beschleunigungsvorgang. Der Wert für die Beschleunigung wurde

im Kapitel 3.2.1.2 berechnet bzw. ist in Tab. 6 gegeben. Folglich muss noch die Beschleunigungszeit berechnet werden. Dazu kommt eine Umstellung der Geschwindigkeit-Zeit-Gleichung zur Anwendung.

$$t = \frac{v_2 - v_1}{a} \quad \left[ \frac{m}{s^2} \right] \quad (3.51)$$

mit  $v_2$  = Endgeschwindigkeit [km/h]

Auch hier vereinfacht sich die Gleichung, wenn die Beschleunigung aus dem Stand heraus erfolgt.

$$t = \frac{v_2}{a} \quad \left[ \frac{m}{s^2} \right] \quad (3.52)$$

### 3.2.1.4 Verzögerung

Theoretisch berechnet sich die Verzögerung analog zur Ermittlung der Beschleunigung. Allerdings existiert für die Verzögerung ein limitierender Faktor. Auf Strecken mit einer punktförmigen Zugbeeinflussung (PZB)<sup>37</sup> besteht ein maximaler Bremsweg von 1.000 m (Vgl. Pacht 2013a, S. 72 ff.). Es wurde daher berechnet, wie stark die Verzögerung sein muss, damit ein Zug, der mit einer spezifischen Geschwindigkeit fährt,<sup>38</sup> innerhalb dieser 1.000 m zum Stehen kommt, siehe auch Gleichung (3.53).

$$b = \frac{v^2}{2 \cdot 1.000 \text{ m}} \quad \left[ \frac{m}{s^2} \right] \quad (3.53)$$

mit  $b$  = Verzögerung [ $m/s^2$ ]  
 $v$  = Geschwindigkeit [ $m/s$ ]

Für die Zugkategorien ergaben sich somit folgende Verzögerungswerte:

- SPFV:  $1,0 \text{ m/s}^2$
- SPNV:  $0,56 \text{ m/s}^2$
- SGV:  $0,40 \text{ m/s}^2$

<sup>37</sup> Die Funktionsweise der PZB wird in Speiser 2011 beschrieben.

<sup>38</sup> Die spezifische Geschwindigkeit ist die jeweilige maximale Betriebsgeschwindigkeit der Zugkategorie (siehe Tab. 6). Die einzige Ausnahme ist die Zugkategorie SPFV. Da PZB-Strecken für eine Maximalgeschwindigkeit von 160 km/h ausgelegt sind, wurde die Verzögerung für den SPFV auf Basis eben jener 160 km/h berechnet. [Vgl. Pacht 2013a, S. 2]

### 3.2.1.5 Verzögerungsweg

Der durchschnittliche Verzögerungsweg berechnet sich analog zum Beschleunigungsweg, wie er in den Gleichungen (3.49) und (3.51) beschrieben ist. Werden diese beiden Gleichungen zusammengeführt, ergibt dies folgenden Ausdruck:

$$l_b = \frac{b}{2} \cdot \left( \frac{v_2 - v_1}{b} \right)^2 + v_1 \cdot \left( \frac{v_2 - v_1}{b} \right) \quad [m] \quad (3.54)$$

mit  $l_b$  = Verzögerungsweg [m]

### 3.2.1.6 Fahrzeugwiderstand

Es soll abschließend in einer kompakten Form aufgezeigt werden, wie der Fahrzeugwiderstand für die einzelnen Zugkategorien berechnet wurde.

#### Zugkategorie SPFV

Für die Zugkategorie SPFV gilt die Gleichung (3.13). Da der Velaro D dem ICE 3 sehr ähnelt, wurden die spezifischen Widerstandskräfte  $W_{Z0}$ ,  $W_{Z1}$  und  $W_{Z2}$  aus der Auflistung nach Wende für den ICE 3 verwendet. [Vgl. Wende 2003, S. 152] Werden diese Parameter in die Gleichung (3.13) eingesetzt, ergibt dies als Ergebnis  $W_{f(SP FV)} = 38,07 \text{ kN}$ . Die Berechnung ist in der Gleichung (3.55) dargestellt. Wird anschließend der absolute Widerstand in den spezifischen Widerstand nach der Gleichung (3.5) umgerechnet, ergibt dies für den Velaro D einen Wert von  $w_{f(SP FV)} = 8,24 \text{ N/kN}$ .

$$\text{SPFV} \quad W_{f(SP FV)} = 3,30 \text{ kN} + 2,422 \text{ kN} \cdot \frac{230 \frac{\text{km}}{\text{h}}}{100 \frac{\text{km}}{\text{h}}} + 5,52 \text{ kN} \left( \frac{230 \frac{\text{km}}{\text{h}}}{100 \frac{\text{km}}{\text{h}}} \right)^2 \approx 38 \text{ kN} \quad (3.55)$$

mit  $W_f$  = Fahrzeugwiderstand [N]

#### Zugkategorie SPNV

Für die Zugkategorie SPNV wird zur Berechnung des Fahrzeugwiderstandes die Gleichung (3.14) angegeben. Die dafür notwendigen Parameter sind in Tab. 7 aufgelistet. Zur Berechnung der Gewichtskraft der Lokomotive  $G_L$  wurde die Achskraft der angetriebenen Achsen<sup>39</sup> mit der Erdbeschleunigung  $g$  multipliziert. Für  $G_W$  wurde analog mit der Gewichtskraft der Laufachsen gerechnet.

<sup>39</sup> Ein 4-teiliger KISS besitzt insgesamt 16 Achsen, von denen vier Achsen angetrieben sind. [Vgl. Stadler o.J.]

Jede der vier Sektionen des Stadler KISS besitzt vier Achsen, das Spitzenfahrzeug weist dabei eine abgerundete Kopfform auf. Die auf diesem Design basierenden Parameter sind in Tab. 7 aufgeführt.

**Tab. 7: Komponenten zur Berechnung des Fahrzeugwiderstandes eines Triebfahrzeugs vom Typ Stadler KISS**

Komponente		Wert	Einheit
Grundwiderstandszahl der Treibradsätze	$w_{WL0}$	0,0030	[1]
Grundwiderstandszahl der Laufradsätze	$w_{WW0}$	0,0014	[1]
Gewichtskraft Lokomotive	$G_L$	524,835	[kN]
Gewichtskraft Wagen	$G_W$	1.574,505	[kN]
Gewichtskraft Zug	$G_Z$	2.099,340	[kN]
Luftwiderstandskonstante des Spitzenfahrzeugs	$W_{Sp}$	2,2	[kN]
Luftwiderstandskonstante von 1 Folgefahzeug	$W_{Fo}$	0,4	[kN]
Anzahl der Folgesektionen	$n_F$	3	[1]

Quelle: Eigene Darstellung nach: Wende 2003, S. 151

Werden nun die entsprechenden Parameter aus Tab. 7 in die Gleichung (3.14) eingesetzt, ergibt dies  $W_{f(SP\dot{N}V)} = 8,67 \text{ kN}$  (siehe Gleichung (3.56)). Wird darauf wieder die Gleichung (3.5) angewendet, führt dies zum spezifischen Fahrzeugwiderstand  $w_{f(SP\dot{N}V)} = 4,13 \text{ N/kN}$ .

$$\text{SPFV} \quad W_{f(SP\dot{N}V)} = 0,0018 \cdot 2.099,34 \text{ kN} + 3,4 \text{ kN} \cdot \left( \frac{120 \frac{\text{km}}{\text{h}}}{100 \frac{\text{km}}{\text{h}}} \right)^2 = 8,67 \text{ kN} \quad (3.56)$$

### Zugkategorie SGV

Für die Zugkategorie SGV muss zuerst die Lokomotivwiderstandskraft nach der Gleichung (3.15) berechnet werden. Bei der für diese Zugkategorie verwendeten Baureihe 185 handelt es sich um eine 4-achsige elektrische Lokomotive, die eine eckige Kopfform aufweist. Die dafür entsprechenden Parameter sind in der Tab. 8 aufgeführt.

**Tab. 8: Komponenten zur Berechnung des Fahrzeugwiderstandes einer Lokomotive der Baureihe 185**

Komponente		Wert	Einheit
Grundwiderstandszahl der Lokomotive	$w_{L0}$	0,0035	[1]
Gewichtskraft Lokomotive	$G_L$	833,85	[kN]
Luftwiderstandskonstante der Lokomotive	$W_{L2}$	5,0	[kN]

Quelle: Eigene Darstellung nach: Wende 2003, S. 151

Werden nun die Parameter aus der Tab. 8 in die Gleichung (3.15) eingesetzt, ergibt dies einen Lokomotivwiderstand von  $W_L = 7,92 \text{ kN}$  (siehe Gleichung (3.57)). Eine Umrechnung in einen spezifischen Widerstand ist für die weitere Nutzung nicht notwendig [Vgl. Wende 2003, S. 146].

$$\text{SGV} \quad W_{f(\text{SPGV})_{\text{Lok}}} = 0,0035 \cdot 833,85 \text{ kN} + 5 \text{ kN} \cdot \left( \frac{100 \frac{\text{km}}{\text{h}}}{100 \frac{\text{km}}{\text{h}}} \right)^2 = 7,92 \text{ kN} \quad (3.57)$$

Als nächstes folgt die Berechnung des Wagenzugwiderstandes nach Strahl für die angehängten Güterwagen nach Gleichung (3.16). Die dafür spezifischen Kennwerte sind in Tab. 9 aufgeführt.

**Tab. 9: Komponenten zur Berechnung des Fahrzeugwiderstandes von Güterwagen**

Komponente		Wert	Einheit
Grundwiderstandszahl der Wagen	$w_{W0}$	0,0016	[1]
Luftwiderstandskonstante der Wagen	$w_{W2}$	0,0057	[1]

Quelle: Eigene Darstellung nach: Wende 2003, S. 153

Zusammen mit der Gleichung (3.16) ergibt dies einen spezifischen Widerstand von  $w_W = 7,4 \text{ N/kN}$ , siehe Gleichung (3.58).

$$\text{SGV} \quad w_W = 0,0016 + 0,0057 \cdot \left( \frac{100 \frac{\text{km}}{\text{h}}}{100 \frac{\text{km}}{\text{h}}} \right)^2 = 0,0073 \quad (3.58)$$

mit  $w_W$  = spezifischer Wagenwiderstand [N/kN]

Die beiden berechneten Werte müssen nun kombiniert werden, um den Fahrzeugwiderstand für den gesamten Güterzug ermitteln zu können. Die Gewichts-

kraft der Wagen  $G_W$  lässt sich dabei aus der Subtraktion der Masse der Lokomotive von der Gesamtmasse des Zuges bestimmen. [Vgl. Wende 2003, S. 146]. Das Ergebnis für den Güterzug stellt sich als ein spezifischer Fahrzeugwiderstand von  $w_{f(SGV)} = 7,42 \text{ N/kN}$  dar.

Alle spezifischen Fahrzeugwiderstände finden sich auch in Tab. 6 wieder.

### **3.2.2 Durchführung der Verifikation**

Auf der Verifikationsstrecke wurde für jede Zugkategorie der entsprechende spezifische und absolute Energiebedarf berechnet. Dazu verkehrte je ein Zug einer jeden Kategorie über die Verifikationsstrecke um die entsprechenden Energiebedarfe zu ermitteln.

#### **3.2.2.1 Berechnungsmodell**

Im Vergleich zum vorgestellten Berechnungsmodell nach Kother in Kapitel 3.1.4, werden zur Berechnung der absoluten Energiebedarfe auf der Verifikationsstrecke einige Anpassungen am Berechnungsmodell vorgenommen. So werden die absoluten Energiebedarfe für die Beschleunigung, für die Beharrung und für die Nebenverbraucher separat berechnet, bevor diese zu einem Gesamtbedarf zusammengefasst werden.

Beim absoluten Energiebedarf für die Beschleunigung wird zur Ermittlung der Transportarbeit folglich nur die Länge des Beschleunigungsweges herangezogen. Beim absoluten Energiebedarf für die Beharrung wird für die Transportarbeit die Abschnittslänge abzüglich des Beschleunigungsweges berücksichtigt. Ebenso wird dieses Verfahren bei der Berechnung des absoluten Energiebedarfes für die Nebenverbraucher angewendet und für jeden spezifischen Wert nur die Wegelänge berücksichtigt, die dafür zutreffend ist.

Aus diesen einzelnen Werten wird anschließend der absolute Gesamtenergiebedarf ab Stromabnehmer ermittelt.



### **3.2.2.2 Auswertung**

Aus Gründen des Umfangs und der Übersichtlichkeit wird in der Arbeit darauf verzichtet in diesem Kapitel jeden der einzelnen Rechenschritte für jede Zugkategorie und für jeden Abschnitt vorzurechnen. Stattdessen sind die Berechnungen in einer Tabelle einsehbar, diese befindet sich im Anhang 4. Zusätzlich ist sie im digitalen Anhang unter der Bezeichnung Anhang\_04\_Verifikation.xlsx auffindbar.

Es ist zu beachten, dass zu jeder Energiebedarfsrechnung zwei finale Werte existieren. Ein Wert ist ohne und ein Wert mit einer pauschalen Energierückspeisung berechnet worden. Weiter verwendet wird der Wert mit der Energierückspeisung, da dieser dem heutigen Stand der Technik eher entspricht.

Für die prozentuale Energierückgewinnung durch den Bremsvorgang werden die pauschalen Rückspeisungsangaben der DB verwendet. In der Zugkategorie SPNV stammen 13 % der genutzten Gesamtenergie aus der Bremsenergieerückspeisung. Für den SPFV werden zehn Prozent und für den SGV fünf Prozent angegeben. [Vgl. DB 2013, S. 126] Diese prozentualen Angaben werden so übernommen, auch wenn sie nicht hundertprozentig korrekt sind, da diese Angaben eine gesamtdurchschnittliche Darstellung über alle Arten von Zugtypen in einer Zugkategorie darstellen. Eine zugspezifische Berechnung der Rückspeisung ist mit den gegebenen Informationen nicht durchführbar, daher werden die Angaben der DB verwendet.

#### **Zugkategorie SPFV**

Für die Zugkategorie SPFV ergibt die Verifikationsstrecke einen absoluten Verbrauch von rund 1.655 kWh. Wird die pauschale Rückspeisequote von 10 % mit eingerechnet, sinkt der absolute Verbrauch auf 1.490 kWh. Um diese Werte mit den Werten in der Fachliteratur vergleichen zu können, muss der absolute Wert wieder in einen spezifischen Wert umgerechnet werden. Als spezifische Einheit wird Wh/tkm verwendet. Für die Zugkategorie SPFV ergibt dies ohne Rückspeisung 43,93 Wh/tkm bzw. 39,54 Wh/tkm mit Rückspeisung. Alle Werte gelten ab Stromabnehmer.

Als Vergleichswert dient eine Berechnung des Energieverbrauchs eines ICE 1 auf einer Ausbaustrecke mit  $v = 230$  km/h. Auf dieser benötigt der ICE 1 rund 35,78 Wh/tkm. [Vgl. Jänsch 1990, S. 309] Im Unterschied zu dem berechneten Wert gilt der Verifikationswert von Jänsch ab Unterwerk. Er berücksichtigt auch eine Energieeinsparung von 27 % aufgrund von energetisch optimiertem Fahren sowie durch Energierückspeisung. Folglich muss der berechnete Wert ohne Rückspeisung noch um den Wirkungsgrad der Fahrleitung<sup>40</sup> erweitert und anschließend um jene 27 % gekürzt werden. Damit ergibt sich ein spezifischer Energiebedarf des Velaro D von 33,06 Wh/tkm. Die Differenz zwischen dem Verifikationswert und dem berechneten Wert liegt damit bei 2,72 Wh/tkm bzw. rund 7,6 %. Im Rahmen der Ungenauigkeit bzgl. der Vergleichsmöglichkeiten erscheint das Berechnungsmodell für den SPFV schlüssig. Zudem geben Morgenstern und Ebinger eine größere Spanne von 25 bis 45 Wh/tkm für den SPFV an, so dass die beiden berechneten Werte als stimmig angenommen werden können [Vgl. Morgenstern/Ebinger 2008, S. 25].

### **Zugkategorie SPNV**

Für die Zugkategorie SPNV ergibt die Berechnung einen absoluten Energiebedarf in Höhe von rund 839 kWh ohne Energierückspeisung. Wird diese berücksichtigt, sinkt der absolute Energiebedarf auf rund 730 kWh. Die spezifischen Energiebedarfe betragen folglich 49,01 Wh/tkm bzw. 42,64 Wh/tkm.

Die Problematik für diese Zugkategorie liegt in der fehlenden Vergleichbarkeit der berechneten Werte. Zwar existiert ein spezifischer Gesamtenergiebedarf von Seiten der DB aus dem Nachhaltigkeitsbericht, doch stellt dieser einen Mittelwert aus allen Zügen auf allen Strecken über ein gesamtes Jahr dar und besitzt daher nur eine bedingte Vergleichbarkeit mit den berechneten Werten. [Vgl. DB 2013, S. 125] So verwendet die DB die Einheit MJ/Pkm. Da nicht bekannt ist, welcher durchschnittliche Auslastungsgrad dem Wert der DB zu Grunde liegt, lässt sich folglich auch keine vergleichende Aussage treffen.

---

<sup>40</sup> Der Wirkungsgrad einer Fahrleitung beträgt 97 % (siehe Kapitel 3.1.4.6).

Ein anderer Ansatz kann nach Morgenstern und Ebinger vorgenommen werden. Nach ihren Aussagen beträgt der spezifische Energieverbrauch für S-Bahnen zwischen 50-60 Wh/tkm [Vgl. Morgenstern/Ebinger 2008, S. 25]. Da S-Bahnen im Vergleich zu Zügen des Regional- und Fernverkehrs deutlich öfter beschleunigen und bremsen und dabei ein ähnliches Leergewicht im Vergleich zu dem hier verwendeten Regionaltriebzug aufweisen,<sup>41</sup> kann davon ausgegangen werden, dass die Werte für den spezifischen Energiebedarf eines Regionaltriebzuges unter denen einer S-Bahn liegen müssen. Dies ist mit den berechneten Werten gegeben.

### **Zugkategorie SGV**

Für den SGV ergibt die Verifikationsstrecke einen absoluten Verbrauch von rund 4.098 kWh ohne Energierückspeisung und 3.893 kWh mit Energierückspeisung. Als spezifischer Wert wird die Einheit Wh/Btkm verwendet.<sup>42</sup> Für die ermittelten Werte ergibt dies ohne Rückspeisung 32,01 Wh/tkm bzw. mit Energierückspeisung 30,41 Wh/tkm. In der Literatur wird der Energieverbrauch für durchschnittliche Güterzüge zwischen 20 Wh/Btkm bis 30 Wh/Btkm angegeben [Vgl. Wende 2003, S. 332]. Der berechnete Wert ohne Rückspeisung liegt rund 7 % darüber, der Wert mit Rückspeisung liegt mit rund 1,4 % fast in dem von Wende angegebenen Bereich. Daher kann der berechnete Wert für die Zugkategorie SGV als hinreichend genau angenommen werden.

## **3.3 Energetische Betrachtung des Beschleunigungsproblems**

In diesem Abschnitt soll aufgezeigt werden, welche zusätzlichen Energiebedarfe bei ungeplanten Halten entstehen. Dazu wird der bereits beschriebene Beispielzug aus der Kategorie SGV verwendet. Im Szenario für die Verifikation der Energiebedarfsrechnung ist der Güterzug einmalig angefahren und bis zum Endbahnhof mit konstanter Geschwindigkeit durchgefahren. In der Realität

---

<sup>41</sup> Ein Viertelzug der Baureihe 481 der Berliner S-Bahn wiegt 59 t, bei einem Vollzug macht dies 236 t [Vgl. FAG o.J.]. Das sind gut 22 t mehr im Vergleich zu hier verwendeten Triebzug Stadler KISS (siehe auch Tab. 6)

<sup>42</sup> Die Einheit Wh/Btkm ist die gleiche Größe wie bei der Zugkategorie SPfV mit Wh/tkm. Daher wird aus Gründen der Vergleichbarkeit der Wert Wh/tkm verwendet.

kommt es dagegen häufig vor, dass Güterzüge den Personenzügen ausweichen müssen, denn in Deutschland werden die Züge, die höherwertige Trassenprodukte gebucht haben höher priorisiert als andere Züge. Bei Zügen, die das gleiche Trassenprodukt nutzen, bekommt der Zug Vorrang, der schneller als der andere ist. [Vgl. DB Netz 420.0105 2006, Abschnitt 3 (3)]

Für die Ermittlung wird zwar sowohl das Modell als auch die Strecke aus der Verifikation verwendet, allerdings in einem idealisierten Zustand, bei dem weder die Bögen noch die Neigungen mit berücksichtigt werden. Der Grund liegt in dem Einfluss der infrastrukturellen Gegebenheiten bei der Energiemehrbedarfsrechnung, da bei der Berechnung des Energiebedarfs für eine Beschleunigung nach Kother die Infrastruktur keine Rolle spielt (siehe Kapitel 3.1.4.2). Allerdings fließen bei der Berechnung für die Beharrung die infrastrukturellen Werte mit ein. Folglich wird nun eine idealisierte gerade und ebene Strecke verwendet, um unverfälschte Werte zu erhalten. Die dabei resultierenden absoluten und spezifischen Energiebedarfe sind folgerichtig niedriger im Vergleich zu den Werten der Verifikation. Die fahrzeugseitigen Kennwerte bleiben von der Idealisierung unberührt. Die Energiemehrbedarfsermittlungen in der Kategorie SGV erfolgen für insgesamt vier Szenarien und werden in Tab. 10 zusammengefasst:

- Szenario 0: kein ungeplanter Halt auf der Strecke<sup>43</sup>
- Szenario 1: ein ungeplanter Halt zwischen dem Abschnitt 6-7
- Szenario 2: zwei ungeplante Halte zwischen den Abschnitten 3-4 und 6-7
- Szenario 3: drei ungeplante Halte zwischen den Abschnitten 3-4, 6-7 und 9-10

Es zeigt sich, dass der Energiebedarf für jeden Halt auf der Beispielstrecke um rund 3,6 % steigt. Die Gleichmäßigkeit des Anstiegs basiert auf der Rechenmethodik sowie der immer gleich hohen Geschwindigkeit. Dieser Wert basiert dabei auf einer idealisierten Strecke. Werden die infrastrukturseitigen Kennwerte aus der Verifikation mit betrachtet, ergeben sich andere Energiemehrbedarfe, da die Auswirkungen der Bögen und Neigungen das Ergebnis mit beeinflussen.

---

<sup>43</sup> Das Szenario 0 stellt dabei das Szenario aus der Verifikation dar.

**Tab. 10: Energiebedarfe je Anzahl an Halten aufgrund von Überholungen**

Szenario	0	1	2	3
abs. Energiebedarf ab Stromabnehmer [kWh]	3.247	3.365	3.484	3.603
spez. Energiebedarf ab Stromabnehmer [Wh/Btkm]	25,36	26,29	27,22	28,15
relative Differenz zum Szenario 0	—	3,63 %	7,29	10,96
absolute Differenz zum Szenario 0 [kWh]	—	118	237	356

Quelle: Eigene Darstellung

### 3.4 Zusammenfassung

Die energetische Herleitung zeigt auf, wie sich der Energiebedarf der verschiedenen Zugkategorien zusammensetzt. Die Energiebedarfe für alle Zugkategorien konnten plausibel verifiziert werden, weshalb angenommen werden kann, dass das in Kapitel 3.2.2.1 beschriebene Berechnungsmodell konsistent ist. Eine Übersicht der ermittelten Werte gibt die Tab. 11 wieder.

**Tab. 11: Zusammenfassung spez. Energiebedarfswerte je Zugkategorie**

Zugkategorie	Spezifische Energiebedarfswerte	
	exklusive Rückspeisung [Wh/Tkm]	inklusive Rückspeisung [Wh/Tkm]
SPFV	43,93	39,54
SPNV	49,01	42,64
SGV	32,01	30,41

Quelle: Eigene Darstellung

Zudem konnte gezeigt werden, dass die Beschleunigung einen deutlich größeren spezifischen Energiebedarf aufweist als eine Fahrt in der Beharrung. Die Aussage, die bereits mit der Abb. 6 getätigt wurde, konnte mit den Erläuterungen aus Kapitel 3.3 bestätigt werden.

## 4 Betrachtung verschiedener Lösungsräume zur Reduzierung des Energiebedarfs

„Der Energieverbrauch stellt einen allgemeinen ökologischen Indikator zur Bewertung von Umweltbelastungen wirtschaftlicher Prozesse dar. Seine Optimierung ist die ideale Verknüpfung von Wirtschaftlichkeit und Umweltschutz.“ [Koppatsch 1996, S. 15]

Das Ziel von Energiesparmaßnahmen ist folglich die Senkung des Energieverbrauchs, denn noch immer weisen die Energiekosten einen Anteil an den Gesamtbetriebskosten eines Gütereisenbahnverkehrsunternehmens von rund 20 % auf [Vgl. Wittenbrink 2012, S. 16]. Wie bereits in der Einleitung dieser Arbeit beschrieben wurde, gab es in den letzten Jahren große Erfolge bei der Senkung der spezifischen Energieverbräuche. Dennoch besteht weiterhin ein großes Optimierungspotential, um den Energiebedarf im Schienenverkehr zu senken [Vgl. Bruckmann/Weidmann 2015, S. 69]. Zu dieser Thematik konnten mehrere Studien und Fachbeiträge recherchiert werden.<sup>44</sup> Eine Analyse dieser Beiträge führte zu der Erkenntnis, dass für Energieeinsparungen im Schienenverkehr viele und zum Teil sehr ähnliche Ansätze existieren. Allgemein kann zwischen drei Lösungsräumen unterschieden werden:

- Energieeinsparungen durch betriebliche Optimierungen
- Energieeinsparungen durch fahrzeugseitige Optimierungen
- Energieeinsparungen durch infrastrukturelle Optimierungen

---

<sup>44</sup> Siehe dazu u.a. Albrecht et al. 2011, Fassbinder 2011, Geiß 2002, Hecht/Keudel 2006, Jänsch 1990, Koppatsch 1996, Morgenstern/Ebinger 2008, Sandor/Wiebe 2011, Sanftleben et al. 2001, Steiner/Pagiola 2005

Im Anhang 5 werden die hier vorgestellten Lösungsräume strukturiert und visuell aufbereitet.

Jedes der drei Lösungsfelder soll nachfolgend genauer betrachtet werden. Dabei werden an dieser Stelle die Maßnahmen nur beschrieben. Dieses Kapitel dient der Übersicht über die verschiedenen potentiellen Methoden, bevor in den nachfolgenden Kapiteln der Fokus auf die infrastrukturellen Maßnahmen gelegt wird.

## **4.1 Lösungsraum: Betriebliche Optimierung**

Die betriebliche Optimierung kann in zwei Phasen unterschieden werden. Zum einen in die Planungsphase, bei der energetische Maßnahmen vor dem Start des operativen Betriebs implementiert werden. Zum anderen in die operative Phase, bei der beispielsweise dispositive Entscheidungen zu einem geringeren Energieverbrauch führen sollen.

### **4.1.1 Planungsphase**

Die betriebliche Optimierung beginnt bereits in der Planungsphase für die Fahrpläne. Je nach Fahrplancharakteristik entstehen mehr oder weniger Überholungen, die einen erhöhten Energiebedarf nach sich ziehen (siehe auch Kapitel 3.3). [Vgl. Bruckmann/Weidmann 2015, S. 70] Eine optimierte Routenwahl verringert Umwege und kann Fahrstrecken verkürzen. „[...] gerade im Einzelwagenverkehr [entstehen] aufgrund des häufig streng hierarchischen Produktionsnetzes Umwegfahrten von Güterwagen, indem diese zunächst entgegen der eigentlichen Transportrichtung zu einem Zugbildungsbahnhof gefahren werden [...]“ [Bruckmann/Weidmann 2015, S. 71]. Die Optimierung liegt hierbei klar in der Verkürzung der Transportstrecken durch optimierte Abläufe und eine Netzgestaltung, die flexibler ist als bisher. So können bei einzelnen Transporten beispielsweise Engpässe umfahren und weniger stark frequentierte Strecken genutzt werden. Das Ziel sollte sein, im SGV wie im SPFV/SPNV eben-

falls kürzeste Routen anbieten zu können. [Vgl. Bruckmann/Weidmann 2015, S. 71]

Ein zweiter Aspekt ist die bessere Ausnutzung vorhandener Trassenkapazitäten. Als Beispiel sei hier das Projekt Netzwerkbahn von DB Schenker genannt, bei der die Produktionssysteme Ganzzug und Einzelwagenverkehr miteinander verknüpft werden [Vgl. DB Schenker 2015]. Einen ähnlichen Ansatz verfolgen Oetting und Glienicke mit dem FreeFloat-Konzept. Dabei werden bestehende Kapazitäten besser genutzt, beispielsweise durch die Vergrößerung der Transportkapazität pro Zug oder auch durch Optimierung des Kapazitätsverbrauchs im Gesamtnetz. [Vgl. Oetting/Glienicke 2010, S. 825]

Eine weitere Möglichkeit der Energieeinsparung liegt in der Streichung von Verkehrshalten, vor allem im SPFV. Bedingt durch die hohen Geschwindigkeiten im SPFV verursacht jeder Halt mit anschließender Beschleunigung auf die mögliche Höchstgeschwindigkeit einen hohen Energieverbrauch. Ein weiterer Nebeneffekt der Verringerung von Verkehrshalten wäre eine verkürzte Fahrzeit zwischen dem Start- und Zielbahnhof.

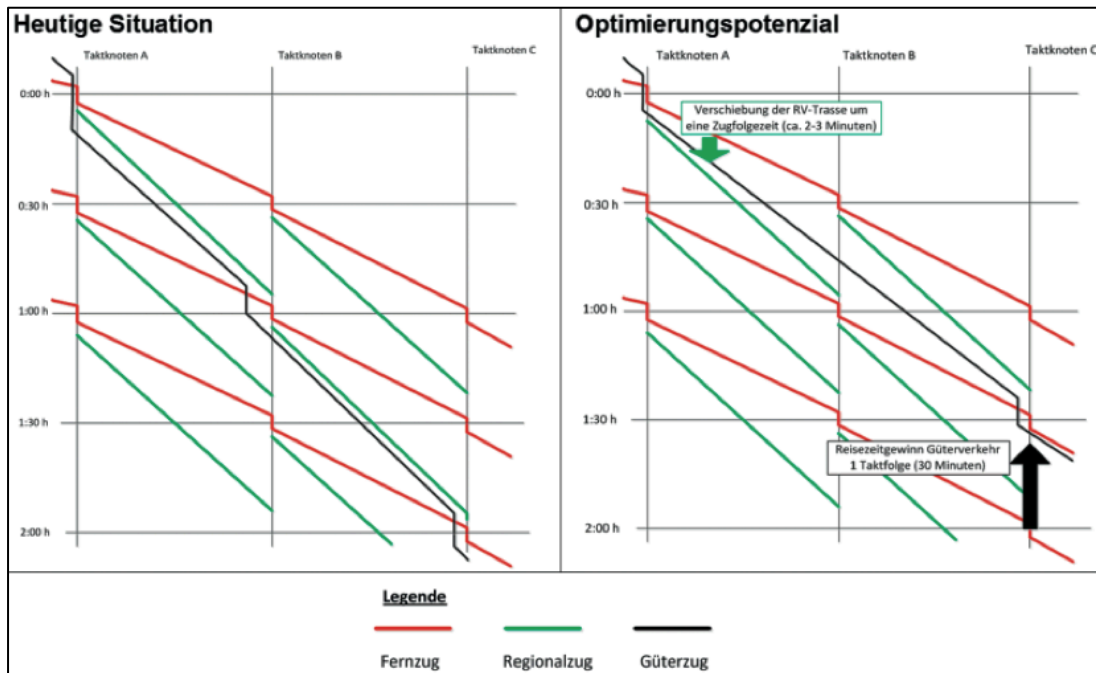
#### **4.1.2 Operativer Betrieb**

Im operativen Betrieb gibt es mehrere Ansätze. Wie bereits in Kapitel 3.3 beschrieben, werden in Deutschland die Züge mit Expresstrassen höher priorisiert als andere Züge. Bei Zügen, die das gleiche Trassenprodukt nutzen, bekommt der Zug Vorrang, der schneller ist. [Vgl. DB Netz 420.0105 2006, Abschnitt 3 (3)] Dadurch kann ein Zug einen Knoten erst verlassen, wenn alle höher priorisierten Züge abgefahren sind. Auf der freien Strecke wirkt sich diese Dispositionsregel so aus, dass ein Güterzug einen höher priorisierten Personenzug passieren lassen muss, indem er auf ein Überholgleis geschickt wird, dort zum Stehen kommt und wartet bis der oder die Personenzüge vorbeigefahren sind. Anschließend beschleunigt der Güterzug wieder und fährt solange auf der Strecke weiter bis er wieder überholt werden muss. Die Abb. 8 zeigt auf, wie die heutige Situation aussieht und wie sie nach einer Optimierung der operativen Abläufe aussehen könnte. Dabei verlässt der SGV vor dem SPNV den Knoten. Dies ist



sinnvoll, wenn der SPNV im Vergleich zum SGV eine geringere durchschnittliche Geschwindigkeit aufweist.<sup>45</sup> Im Ergebnis entstehen so weniger außerplanmäßige Halte von Güterzügen, die eine deutliche Energieeinsparung mit sich bringen. [Vgl. Bruckmann/Weidmann 2015, S. 72]

**Abb. 8: Optimierte Zugreihung im Knoten und auf der Strecke**



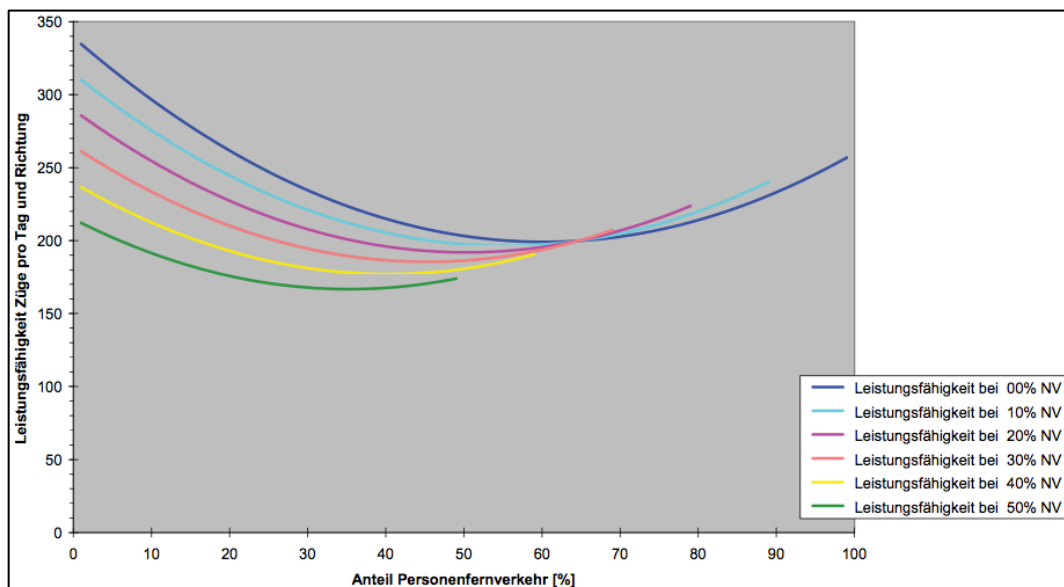
Quelle: Bruckmann/Weidmann 2015, S. 72

Als ein weiterer Ansatzpunkt kann eine verbesserte energiesparende Fahrweise betrachtet werden. Dazu können, unter Berücksichtigung der Einflussmöglichkeiten durch die verwendete LST, stationäre oder zuglokale statische bzw. dynamische Hilfsmittel eingesetzt werden. [Vgl. Albrecht et al. 2011, S. 39] Die Weiterentwicklung dieser zugbezogenen Systeme betrachtet die Netzebene eines jeden Betreibers. So könnte für jedes Schienenfahrzeug im Netz eine Echtzeitoptimierung der spezifischen Fahrplandaten stattfinden. Dabei erhalten alle Lokführer ständig aktualisierte Geschwindigkeitsvorgaben, um beispielsweise außerplanmäßige Halte vor Knoten zu verhindern. [Vgl. Bruckmann/Weidmann 2015, S. 72; Vgl. Sanftleben et al. 2001, S. 510; Sandor/Wiebe 2011, S. 37]

<sup>45</sup> Dies ist beispielsweise der Fall, wenn die Höchstgeschwindigkeit bei beiden Zugkategorien annähernd gleich ist, der Regionalzug aber in kurzen Abständen seine Betriebshalte durchführt.

Ein weiterer Aspekt liegt in der generellen Harmonisierung der Geschwindigkeitsdifferenzen der verschiedenen Zugkategorien. Denn je größer das Geschwindigkeitsdelta zwischen den verschiedenen Zugkategorien ist, desto geringer ist die Kapazität der Strecke. Dies zeigt die Abb. 9 sehr deutlich. Auf der Mischstrecke M230<sup>46</sup> beträgt bei einem Mischverhältnis von 20 % SPFV, 30 % SPNV sowie 50 % SGV die Leistungsfähigkeit ca. 210 Züge pro Tag und Richtung. Auf einer Hochgeschwindigkeitstrasse P300<sup>47</sup> beträgt die Leistungsfähigkeit bei einem gleichen Mischverhältnis ca. 70 Zügen pro Tag und Richtung [Vgl. BMVBW 2005, S. 103]. Ein Ziel liegt daher in der Harmonisierung der Geschwindigkeiten. So sollten, wann immer es möglich ist, Verkehre gleicher Art bzw. gleicher Geschwindigkeit gebündelt werden, um die Leistungsfähigkeit zu erhöhen und außerplanmäßige Überholungen zu minimieren.

**Abb. 9: Leistungsfähigkeit einer Strecke Typ M230 mit verschiedenen Mischungsverhältnissen**



Quelle: BMVBW 2005, S. 103

Ein vierter Aspekt im operativen Betrieb ist der erhöhte Luftwiderstand eines Güterzuges aufgrund einer ungleichmäßigen Verteilung der Beladung bzw. unterschiedlicher Wagenprofile bei gemischten Güterzügen. Vor allem bei Contai-

<sup>46</sup> M230 steht für eine Mischverkehrsstrecke mit einer Höchstgeschwindigkeit von  $v_{max} = 230$  km/h [Vgl. BMVBW 2005, S. 103].

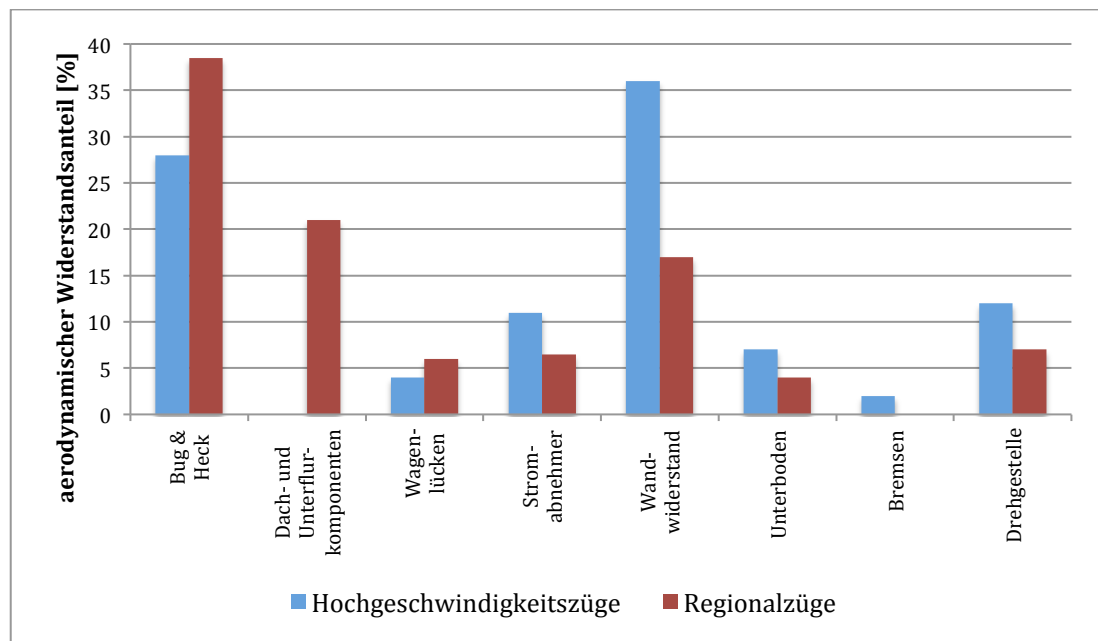
<sup>47</sup> P300 beschreibt eine reine Personenverkehrsstrecke bei einer Höchstgeschwindigkeit von  $v_{max} = 300$  km/h [Vgl. BMVBW 2005, S. 103].

nerzügen mit großen Lücken zwischen den einzelnen Containern entstehen so hohe Luftwiderstände, die den Energiebedarf erhöhen. Auch die Wagenreihung bei gemischten Güterzügen kann optimiert werden. Ebenso können die Lücken zwischen den Wagen verkleinert werden, wenn die in Europa weit verbreitete Schraubenkupplung durch neue Technologien ersetzt wird. [Vgl. Bruckmann/Weidmann 2015, S. 70 f.]

## 4.2 Lösungsraum: Fahrzeugseitige Optimierung

Die fahrzeugseitige Optimierung dient der reinen Minimierung der benötigten Traktionsenergie und kann nochmals unterschieden werden in die Optimierung der Triebfahrzeuge bzw. Triebzüge und die Optimierung der Wagen bzw. des Wagenmaterials. Generell kommt für die fahrzeugseitige Optimierung einzig die Reduzierung der Widerstände in Frage. Besonders der aerodynamische Widerstand spielt dabei eine wichtige Rolle.<sup>48</sup>

**Abb. 10: Typische aerodynamische Widerstandsanteile bei Hochgeschwindigkeits- und Regionalzügen**



Quelle: Veränderte Darstellung nach: Marek et al. 2010, S. 713

<sup>48</sup> Der aerodynamische Widerstand ist ab ca. 60 km/h der dominierende Widerstand und geht mit dem Quadrat der Geschwindigkeit ein. Daher ist er vor allem für schnell fahrende Schienenfahrzeuge enorm wichtig. [Vgl. Marek et al. 2010, S. 713 f.]

Wird die Abb. 10 betrachtet, ist eindeutig erkennbar, dass sich der aerodynamische Widerstand durch eine optimierte Gestaltung von Kopfformen, Drehgestellen sowie Pantographen verringern lässt. Im Gegensatz zu Hochgeschwindigkeitszügen weisen Regionalzüge noch immer einen großen Optimierungsbedarf bei der Gestaltung der Dach- und Unterflurkomponenten auf. Der bei beiden Zugkategorien hohe Anteil des Wandwiderstands, lässt sich technisch nur schwer minimieren und wird daher nicht weiter betrachtet. [Vgl. Marek et al. 2010, S. 713 f.]

#### **4.2.1 Optimierung Wagen**

Wie in Abb. 10 dargestellt, führen optimierte Drehgestelle zu einem aerodynamischen Vorteil. Neben diesem ist aber auch der Rollwiderstand reduzierbar. Gerade Güterwagen entsprechen in vielen technischen Belangen nicht dem aktuellen Stand der Technik. So nutzt in Europa die überwiegende Mehrheit der Güterwagen das Y25-Drehgestell, welches aber einen hohen Rollwiderstand aufweist. Bruckmann und Weidmann sehen hier eine Reduzierung von Fahrzeugwiderständen von bis zu 25 % als möglich an. [Vgl. Bruckmann/Weidmann 2015, S. 71] Mögliche Alternativen sind das Drehgestell RC25NT oder auch das LEILA-Drehgestell. Beide Drehgestelle weisen u.a. statt starrer Achsen radialverstellbare Achsen auf. Für das LEILA-Drehgestell wurde bei Probefahrten Energieeinsparungen von bis zu 25 % nachgewiesen. [Vgl. Scholdan et al. 2011, S. 156-159; Vgl. Hecht/Keudel 2006, S. 42]

Da zudem bei Güterwagen bisher keine Möglichkeit zur Rückspeisung der Bremsenergie besteht, sollte geprüft werden inwiefern sich die Einführung von generatorischen Bremsen auf Güterwagen lohnt.<sup>49</sup>

Zusätzlich kann eine optimierte Wagenkonstruktion, die den Wagen leichter und aerodynamischer gestaltet, den Luft- und damit auch den Fahrzeugwiderstand ebenfalls senken. Als positiver Nebeneffekt eines leichteren Güterwagens

---

<sup>49</sup> Neben der dann deutlich effizienteren Rückspeisung von Bremsenergie bei Güterzügen wäre auch die Lärmbelastung, verursacht durch die bis heute verwendete Klotzbremse, wohl geringer.

ergibt sich bei gleichbleibender Achslast eine höhere Zuladung pro Wagen. [Vgl. Koppatsch 1996, S. 19]

Ein weiterer Ansatz betrifft die Klimatechnik in Reisewagen. Diese verursacht zwei energetische Verbräuche. Zum einen den direkten Energieverbrauch beim Kühlen/Wärmen und zum anderen erhöhen Klimaanlage den Bedarf an Traktionsenergie, da eine zusätzliche Masse bewegt werden muss. Da die Heizleistung den größten Anteil am Energiebedarf einer Klimaanlage aufweist, bieten sich vor allem hier Ansätze zur Energiebedarfsreduzierung an. Eine Möglichkeit zur Reduzierung des Energiebedarfs liegt in der Nutzung von Abwärme für die Heizleistung. Ein anderer Ansatz ist die Verwendung umweltschonender Kältemittel, die einen reduzierten Energiebedarf aufweisen. Ein allgemeiner Ansatz ist zudem die Gewichtsreduzierung der Klimaanlage. [Vgl. Morgenstern/Ebinger 2008, S. 25 f.]

#### 4.2.2 Optimierung Triebfahrzeuge

Der am meisten verwendete Ansatz ist die Steigerung der Energieeffizienz im Betrieb. So versuchen die Hersteller beispielsweise durch Neugestaltung von Motoren den Energiebedarf allgemein zu senken [Vgl. Mallikat 2014, S. 14].

Bei dieselgetriebenen Triebfahrzeugen geht zudem die Energie beim Bremsen als Wärme verloren. Mit einer Rückspeisung der Bremsenergie ließen sich bis zu 29 % an Kraftstoffkosten einsparen. Dazu müssen sogenannte Powerpacks<sup>50</sup> zu umfassenden Speichereinheiten oder auch Elektromotoren weiterentwickelt werden, so dass diese nicht nur die kinetische Energie während des Bremsens für die Hilfsaggregate verwenden, sondern die Energie auch speichern und zu einem späteren Zeitpunkt wiederverwenden können. Mit diesen Hybridmotoren kann der Energiebedarf deutlich reduziert werden. [Vgl. Nick 2002, S. 76-81; Vgl. Steiner/Pagiola 2005, S. 207-210]

---

<sup>50</sup> Ein Powerpack steht für ein komplettes Antriebssystem. Dabei sind neben dem Motor alle Einzelkomponenten, die zu einer kompletten Antriebsanlage gehören, auf einem gemeinsamen Tragrahmen aufgebaut. Powerpacks stellen damit eine einbaufertige Einheit dar, die durch ihre flache Bauweise im Unterflurbereich des Fahrzeugs montiert werden kann. [Vgl. Nick 2000, S. 42]

Bei den elektrisch betriebenen Fahrzeugen kann die vorhandene Rückspeisefähigkeit verbessert werden, so dass Bremsenergie bei jedem Halt nicht unnötig als Wärme verloren geht. Möglich wäre dies durch eine Erhöhung der zulässigen elektrischen Bremskraft auf 300 kN.<sup>51</sup> Damit das Bahnenergienetz keine zu großen Belastungsspitzen infolge der erhöhten Rückspeisung erfährt, schlagen Bruckmann und Weidmann vor, die Bremsenergie lokal im Triebfahrzeug zwischenspeichern. Somit könnte die Energie bei der anschließenden Beschleunigung auch aus dem Zwischenspeicher bezogen werden. [Vgl. Bruckmann/Weidmann 2015, S. 71]

Ein anderer Weg ist die Implementierung einer automatischen Fahr-Brems-Steuerung, die einen energetisch optimierten Beschleunigungs- und Bremsprozess ermöglicht. [Vgl. Koppatsch 1996, S. 19]

Auch können sogenannte Hybrid-Lokomotiven eine Energiereduzierung ermöglichen, indem auf den Einsatz von energetisch ineffizienteren Diesellokomotiven verzichtet wird. Mit einer Hybrid-Lokomotive ist es möglich im Nah- und Rangierbereich mit dem integrierten Diesellaggregat zu arbeiten, während für die Fahrt zum Zielbahnhof die elektrische Traktion verwendet werden kann. [Vgl. Bruckmann/Weidmann 2015, S. 71; Vgl. Mallikat 2014, S. 14]

### 4.3 Lösungsraum: Infrastruktureseitige Optimierung

Ein Ansatz besteht in der Optimierung einer Streckenführung durch Vermeidung von zu engen Radien oder hohen Neigungen. Neben den erhöhten Widerständen beim Befahren einer engen Kurve führt auch das Beschleunigen nach dem Passieren der Kurve zu einem erhöhten Energieverbrauch. Generell bietet es sich an, Streckenabschnitte zu verbessern, die eine Einschränkung des normalen Betriebes verursachen,<sup>52</sup> um die daraus resultierenden Verzögerungen und erhöhten Energiebedarfe zu reduzieren. Ein Nebeneffekt wäre zusätzlich

---

<sup>51</sup> Aktuell beträgt in Deutschland die maximal zulässige elektrische Bremskraft 240 kN [DB Netz 915.0107 2006, Abschnitt 1 (11)].

<sup>52</sup> Das können u.a. La-Stellen sein (siehe auch Kapitel 7.5).

eine direktere Linienführung, einhergehend mit einer verkürzten Streckenlänge. Dies resultiert in einem geringeren Energiebedarf.

Die Erstellung einer Infrastruktur verbraucht ebenfalls Energie. Da dies aber kein bahnspezifisches sondern ein allgemeines Thema im Bauwesen ist, wird dieser Energieverbrauch als gegeben angenommen. Es lässt sich aber durch eine Steigerung von Zugzahlen auf einer Strecke der spezifische Energiebedarf für die Erstellung der Strecke pro Zugfahrt senken. Denn je mehr die Infrastruktur genutzt wird, desto niedriger ist der Aufwand für deren Erstellung und Unterhalt je transportierter Tonne bzw. beförderter Person. Dazu muss die Trassenkapazität gesteigert werden. Eine optimierte LST-Steuerung kann die Trassenkapazität einer Strecke um bis zu 15 % erhöhen. Gleichzeitig warnen Bruckmann und Weidmann davor, dass die Einführung eines European Train Control System (ETCS)<sup>53</sup> ggf. zu einer Senkung der Trassenkapazität führen kann. [Vgl. Bruckmann/Weidmann 2015, S. 70] Eine Form der optimierten LST-Steuerung besteht in einem Hochleistungsblock basierend auf der Linienzugbeeinflussung. Dies ermöglicht verkürzte Abstände zwischen den einzelnen Zügen, da die Blockabstände kleiner sind. [Vgl. Geiß 2002, S. 60] Somit lässt sich die Trassenkapazität einer Strecke deutlich erhöhen.

Zudem sollte die Infrastruktur leistungsfähiger bzgl. der Rückspeisung von Bremsenergie werden. Aktuell können Schienenfahrzeuge nur einen gewissen Teil der Bremsenergie zurückspeisen, je nachdem wie viele Verbraucher in der Nähe diese Energie auch nutzen können [Vgl. Steiner/Pagiola 2005, S. 207]. Eine Verknüpfung zu Speichereinheiten an der Strecke oder eine Verbindung zu anderen, nicht eisenbahnspezifischen Verbrauchern wäre eine Maßnahme, um den Gesamtenergiebedarf zu reduzieren.

---

<sup>53</sup> Die Grundlagen von ETCS können in Maschek 2013 auf den Seiten 543-550 nachgelesen werden.

## 5 Engpassanalyse

Die Grundlage für die Ableitung von Ausbaumaßnahmen ist die Identifikation der Engpässe im Schienennetz. In diesem Kapitel werden die dafür notwendigen Begriffe und Verfahren erläutert und die verschiedenen Arten der Engpässe beschrieben.

### 5.1 Einleitung und Begriffsdefinitionen

Um der Komplexität von Engpassanalysen gerecht zu werden, müssen vorab die Begrifflichkeiten geklärt und ein kurzer Abriss über die möglichen Verfahren gegeben werden. Dies soll in den folgenden Unterkapiteln geschehen.

#### 5.1.1 Kapazität und Leistungsfähigkeit

Zunächst soll das Konzept der Kapazität von Verkehrswegen erklärt werden, welches hinter dem Begriff des Engpasses steht. „Unter der Kapazität von Verkehrssystemen wird im Allgemeinen deren Vermögen verstanden, die Nachfrage nach dem Transport von Personen und Gütern [...] mit einer definierten Qualität zu befriedigen.“ [Wendler et al. 2012, S. 15] Daneben existiert in der Eisenbahnbetriebswissenschaft der Begriff der Leistungsfähigkeit, der in der überwiegenden Mehrheit der recherchierten Quellen gleichbedeutend mit dem Begriff der Kapazität verwendet wird.<sup>54</sup> Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden diese Begriffe ebenfalls gleichbedeutend verwendet werden. Letztlich ist die Anzahl der fahrbaren Züge pro Zeiteinheit bei vorgegebenem Qualitätsniveau

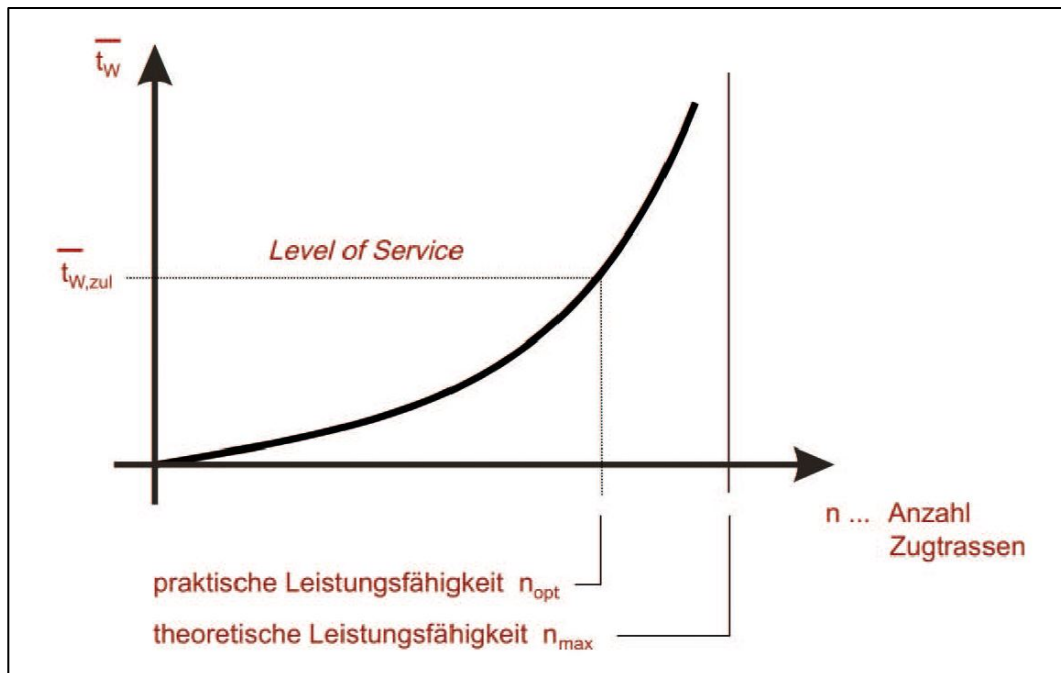
---

<sup>54</sup> Eine Differenzierung der Begriffe findet sich beispielsweise bei [Frank 2013, S. 7-12].



entscheidend. Diese Kapazität lässt sich in vielen Fällen durch eine analytische Berechnung annähernd ermitteln. Grundlage dieser Berechnung ist die Warteschlangentheorie, d.h. der Zusammenhang zwischen der Belastung einer Strecke und den im System auftretenden Wartezeiten [Vgl. Pahl 2013a, S. 129]. Der progressive Verlauf dieser Abhängigkeit ist in Abb. 11 dargestellt.

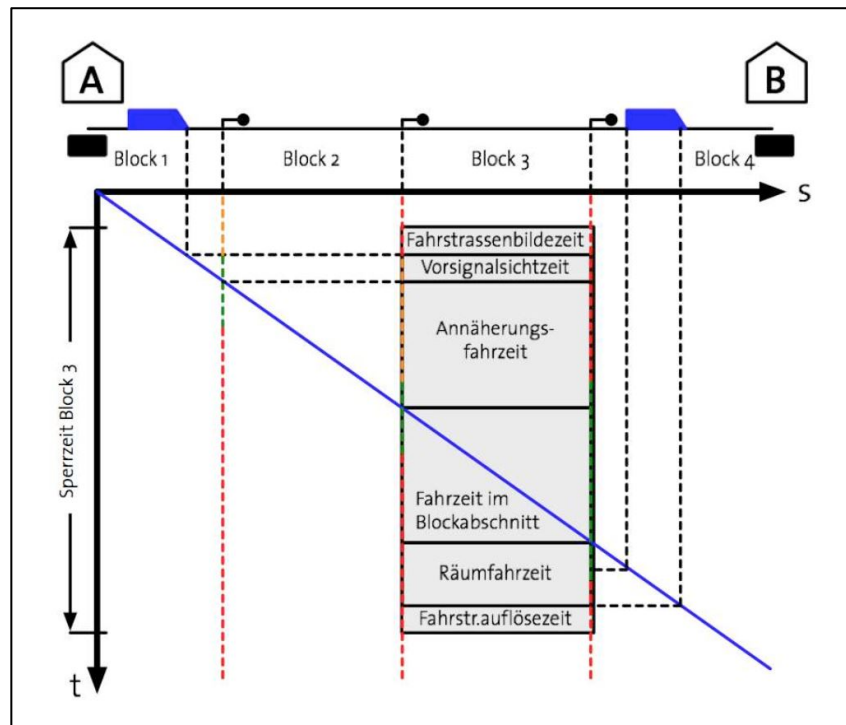
**Abb. 11: Leistungsfähigkeit von Eisenbahnstrecken**



Quelle: Wendler et al. 2012, S. 16

Die theoretische Leistungsfähigkeit ist erreicht, wenn die Wartezeit gegen unendlich geht. Dieser Wert hat in der Praxis keine Bedeutung [Vgl. Pahl 2013a, S. 130]. Die praktische Leistungsfähigkeit liegt deutlich darunter und ist abhängig vom akzeptierten Qualitätsniveau [Vgl. Wendler et al. 2012, S. 16].

In der Praxis ist hierfür die Ermittlung von Sperrzeiten notwendig, die Ausdruck der Belegung von Infrastruktur sind und die für einen Zug zur sogenannten Sperrzeitentreppe zusammengefügt werden können [Vgl. Pahl 2013a, S. 110]. Die einzelnen Bestandteile der Sperrzeit finden sich in Abb. 12.

**Abb. 12: Sperrzeiten**


Quelle: Frank 2013, S. 11

Die wichtigsten Einflussfaktoren auf die Leistungsfähigkeit sind [Vgl. Frank 2013, S. 27]:

- Geschwindigkeit (Maximum von Zügen und Infrastruktur)
- Beschleunigungs- / Bremsvermögen
- Zuglänge
- Laufweg der Züge
- Heterogenität von Geschwindigkeit und Zugmix<sup>55</sup>
- Leit- und Sicherungstechnik

Je genauer diese Faktoren einfließen, desto präziser lässt sich die Kapazität bestimmen, desto komplexer wird jedoch die Berechnung.

### 5.1.2 Abstraktion der Infrastruktur

Engpässe im Schienennetz äußern sich in den meisten Fällen auf sehr einfache Art: Grundsätzlich handelt es sich um ein Missverhältnis von Trassenangebot

<sup>55</sup> Zugmix beschreibt die Anzahl und Reihenfolge von Zügen unterschiedlicher Geschwindigkeit.

und -nachfrage, also um Belegungskonflikte, bei denen zwei oder mehrere Züge zur gleichen Zeit den gleichen Fahrweg nutzen wollen [Vgl. Sewcyk 2004, S. 1]. Der Begriff Trasse<sup>56</sup> wiederum beschreibt „[...] die zeitliche und räumliche Inanspruchnahme der Infrastruktur durch eine Zugfahrt.“ [Pachl 2013a, S. 4] Die Entstehung solcher Engpässe hat unterschiedliche Ursachen, welche in den folgenden Kapiteln dargestellt werden.

Zur besseren Beschreibung lässt sich die Eisenbahninfrastruktur (in Anlehnung an die Graphentheorie) in zwei große Teilbereiche zerlegen, in Knoten und Kanten. Knoten im engeren Sinne sind sämtliche Elemente, die eine Verzweigung beinhalten, also Weichen, Kreuzungen und Kreuzungsweichen<sup>57</sup>. Diese werden im Folgenden unter der Bezeichnung Knotenelement geführt. Im weiteren Sinne werden größere Bereiche mit meist mehreren Knotenelementen wie Bahnhöfe, Abzweigstellen oder Überleitstellen ebenfalls als Knoten bezeichnet<sup>58</sup>. Attribute von Knoten können beispielsweise der Typ (Bahnhof, Abzweigstelle, usw.), die Gleisanzahl oder die Anzahl angrenzender Strecken sein. [Vgl. Gille 2014, S. 19]

Als Kanten gelten sämtliche Bereiche zwischen Knoten. Im engeren Sinne sind dies alle Bereiche zwischen Knotenelementen. Im weiteren Sinne sind auch großräumige Bereiche zwischen Knoten wie Bahnhöfe gemeint. Kleinere Knoten wie Überleitstellen werden hierbei vernachlässigt. Eigenschaften von Kanten beinhalten beispielsweise die Anzahl der Streckengleise, die Abschnittslänge zwischen Knoten, die Höchstgeschwindigkeit oder die Längsneigung [Vgl. Gille 2014, S. 19]. Für die vorliegende Arbeit werden die oben genannten weiteren Auslegungen der Begriffe Knoten und Kanten verwendet. Die engere Definition wird mit Knoten- bzw. Kantenelement bezeichnet, womit immer einzelne Fahrwegelemente, z.B. Weichen, gemeint sind. Hieraus ergibt sich das erste Unterscheidungskriterium für die weitere Untersuchung, nämlich ob sich der Engpass in einem Knoten oder auf einer Kante befindet.

---

<sup>56</sup> Auch Fahrplantrasse oder Zugtrasse genannt.

<sup>57</sup> Kreuzungen erlauben keinen Gleiswechsel, bei Kreuzungsweichen ist dies möglich.

<sup>58</sup> Abzweigstellen bezeichnen Verknüpfungspunkte von zwei oder mehreren Strecken. Überleitstellen ermöglichen auf zweigleisigen Strecken den Wechsel von einem auf das andere Gleis [Vgl. Pachl 2013a, S. 7].

## 5.2 Grundlagen der Engpassanalyse

In den folgenden Kapiteln wird die Vorgehensweise für die Engpassanalyse erläutert. Es werden grundsätzliche Arten von Engpässen differenziert und anhand der verwendeten Literatur Engpässe dieser Art im deutschen Schienennetz identifiziert. Abschließend werden die Engpasskategorien im Detail festgelegt, auf denen die Modellierung und die Energieberechnung basieren.

### 5.2.1 Kantenengpässe

Engpässe auf Kanten entstehen entweder durch eine zu hohe Auslastung bzw. eine zu niedrige Kapazität der Strecke oder durch inhomogene Geschwindigkeiten von Zügen. Im letzteren Fall läuft ein schnell fahrender Zug auf einen langsameren Zug auf. Dies hat entweder zur Folge, dass der schnellere Zug deutlich gebremst wird, solange er hinter dem langsameren herfährt, oder aber der langsamere Zug auf einem Ausweichgleis anhalten muss, bis der schnellere Zug ihn überholt hat. Dieser Vorgang wird im Folgenden Überholung genannt. Überholungen werden im Fahrplan bereits berücksichtigt, sodass im störungsfreien Betrieb eine Behinderung eines schnellen Zuges durch einen langsameren Zug nicht vorkommt [Vgl. Pacht 2013a, S. 190]. Allerdings besteht natürlich die Problematik, dass langsame Züge häufig überholt werden und dadurch oft anhalten und wieder anfahren müssen. Im Falle von Personenzügen wird dies meist mit einem Verkehrshalt verknüpft und stellt daher kein Problem dar [Vgl. Pacht 2013a, S. 200]. Güterzüge hingegen müssten zwischen Start- und Zielbahnhof nicht anhalten, werden aber durch Überholungen dazu gezwungen.

Das Vorhandensein eines Engpasses ist stark abhängig vom Betriebsprogramm der jeweiligen Strecke. Auf Kanten äußert sich dies in der reinen Zugzahl und in der Struktur der Züge.<sup>59</sup> Die Hauptproblematik der überlasteten Kanten ist die zu geringe Kapazität der Strecken. Trassenanmeldungen können nicht oder nicht zur gewünschten Zeit berücksichtigt werden, zudem verliert der Fahrplan

---

<sup>59</sup> Struktur bezeichnet in diesem Fall die „Anteile von Zügen in den Zugarten und Gattungen, Reihenfolge der Züge“ [DB Netz Modul 405.0201 2008, Abschnitt 3 (5)]

durch die hohe Zugdichte an Stabilität, wodurch auch kleine Störungen sich schnell auf die Pünktlichkeit auswirken [Vgl. Pachl 2013a, S. 193]. Da der Fokus dieser Arbeit auf dem Energieverbrauch der Eisenbahn liegt, wird im Weiteren nur die Thematik der Überholungen von Güterzügen durch schnellere Züge betrachtet.

Eine Überlastung muss nicht zwangsläufig über die Dauer eines gesamten Tages bestehen. In vielen Fällen liegt nur zeitweise ein Engpass vor. Dieser kann ausgelöst werden durch Verstärkerzüge<sup>60</sup> im Personenverkehr oder durch eine Häufung von Güterzügen im Hafenhinterlandverkehr zu bestimmten Tageszeiten. Letztlich ist aber nicht eine generelle Verfügbarkeit von Trassen notwendig, sondern eine Verfügbarkeit zum gewünschten Zeitpunkt und für die gewünschte Relation. [Vgl. Birn/Mann 2010, S. 5-48 f.]

Eine spezielle Form des Kantenengpasses ist die Langsamfahrstelle (La-Stelle). Sie wird hauptsächlich zur Geschwindigkeitsreduktion bei Baustellen und Mängeln an der Infrastruktur eingerichtet [Vgl. Pachl 2013b, S. 438]. Dadurch wird erstens die Kapazität der Strecke vermindert und zweitens müssen Züge abbremsen und wieder beschleunigen, woraus ein erhöhter Energieverbrauch resultiert. Allgemeiner gesprochen ist jede Stelle im Netz, die einen kurzen Einbruch der Fahrgeschwindigkeit nach sich zieht, eine La-Stelle, auch wenn sie nicht als solche bezeichnet wird. Entscheidend im Sinne dieser Arbeit ist nur, ob sich mit einer infrastrukturellen Ausbaumaßnahme der Engpass beheben und der Traktionsenergieverbrauch senken lässt.

### **5.2.2 Knotenengpässe**

Was die Knoten betrifft, ist die Reihenfolge der Züge bzw. die zeitliche Nähe der Knotennutzung entscheidend. Grundsätzlich ist jeder Knoten und jedes Knotenelement ein potentieller Engpass, da immer die Möglichkeit besteht, dass zwei Züge gleichzeitig den gleichen Fahrweg nutzen wollen. Je höher die Wahrschein-

---

<sup>60</sup> Verstärkerzüge sind Züge zusätzlich zu regulären Taktzügen, mit deren Hilfe Spitzenbelastungen auf der Nachfrageseite abgefangen werden sollen. Beispielsweise kann ein Stundentakt in der morgendlichen Hauptverkehrszeit zu einem Halbstundentakt verdichtet werden.

lichkeit ist, dass es auch tatsächlich zu einem solchen Konflikt kommt, desto wichtiger ist dieses Knotenelement für eine Engpassbetrachtung. Bei einer hohen Anzahl an Zügen, die über ein Knotenelement fahren, ist diese Wahrscheinlichkeit entsprechend hoch.

Die Engpässe in Knoten können wie folgt beschrieben werden: Hier ist ein Belegungskonflikt die Ursache des Engpasses. Besonders häufig kommt dies an Abzweigstellen und bei Bahnhofseinfahrten bzw. -ausfahrten vor. Im einfachsten Fall möchten zwei Züge dasselbe Knotenelement oder dieselbe Gruppe von Knotenelementen nutzen. Im störungsfreien Betrieb kommen diese Konflikte nicht vor, da die Fahr- und Trassenplanung keine Fahrwege doppelt belegt [Vgl. Pachl 2013a, S. 190]. Erst durch Verspätungen ergeben sich die beschriebenen Probleme.

Ein großes Problem stellt die Auswahl der zu untersuchenden Knoten dar. Nach den bisherigen Ausführungen könnte an dieser Stelle eine strukturierte Analyse erfolgen, welche Knoten im deutschen Schienennetz aufgrund ihres Betriebsprogramms und ihrer Infrastruktur in die Liste der Engpassstellen aufgenommen werden sollten. Dies lässt sich sowohl wegen der Komplexität einer solchen Analyse, als auch aufgrund der hierfür nicht verfügbaren Daten im Rahmen dieser Arbeit nicht bewerkstelligen. Analog zu den Engpässen der Kanten gibt es zwar Knoten, die für überlastet erklärt sind (z.B. Hamburg Hbf.), eine genaue Untersuchung dieser Knoten scheidet aber aus Komplexitätsgründen ebenfalls aus [Vgl. DB Netz 2014a, S. 43 f.]. Stattdessen wird ein Musterknoten entworfen, der hinsichtlich seiner Energieeinsparpotentiale geprüft wird (siehe Kap. 7.4).

### 5.2.3 Analyse der Quellen

Da eine eigene Engpassanalyse nicht zur Themenstellung dieser Arbeit gehört, wurden die vorhandenen Engpässe im deutschen Schienennetz durch eine Recherche vorhandener Engpassanalysen ersetzt. Die Auswahl der Strecken basiert auf folgenden Quellen:<sup>61</sup>

---

<sup>61</sup> Siehe auch: BMVBW 2003, Birn/Mann 2010, ^ Netz 2014, DB 2014d, Holzhey 2010

- Bundesverkehrswegeplan (BVWP) 2003
- Abschlussbericht Überprüfung des Bedarfsplanes für die Bundesschienenwege
- Für überlastet erklärte Strecken gemäß Schienennetz-Benutzungsbedingungen 2015 der DB Netz
- Infrastrukturzustands- und Entwicklungsbericht 2013 der DB
- Ausbaukonzept Schienennetz 2025 / 2030 des Umweltbundesamtes

Die Basis der Analyse bilden die Vorhaben des BVWP 2003. Im Folgenden soll der Ablauf der Bundesverkehrswegeplanung kurz erläutert werden. Die Projektvorschläge für den BVWP werden im Bereich Schiene durch die DB Netz, die Bundesländer, Verbände oder Privatpersonen<sup>62</sup> eingereicht [Vgl. BMVI 2015, S. 5]. Mithilfe einer detaillierten Bewertungsmethodik, deren Engpassanalyse auf der Berechnung zukünftiger Reisenden- und Güterströme beruht, werden die wichtigsten Projekte identifiziert und entweder dem vordringlichen oder dem weiteren Bedarf zugeordnet.<sup>63</sup> Wichtige Kriterien sind vor allem die Dringlichkeit und die Wirtschaftlichkeit der Vorschläge. Der vordringliche Bedarf umfasst die laufenden und fest disponierten Vorhaben sowie noch nicht begonnene Teilprojekte von Maßnahmen des BVWP 1992. Hinzu kommen neue Vorhaben, die als gesamtwirtschaftlich sinnvoll erachtet wurden und weitere Maßnahmen wie Ausbauten in Knoten und Anlagen des kombinierten Verkehrs. Im weiteren Bedarf sind Vorhaben enthalten, deren wirtschaftlicher Nutzen zwar gegeben ist, die aber den Finanzrahmen bis 2015 überschreiten. [Vgl. BMVBW 2003, S. 51 ff.]

Der neue BVWP 2015 wird erst nach der Fertigstellung dieser Arbeit erscheinen und kann somit keinen Eingang in die Betrachtung finden. Die laufenden und fest disponierten Vorhaben werden nicht berücksichtigt, da sie zum größten Teil bereits fertiggestellt sind [Vgl. BMVBW 2003, S. 53]. Somit sind nur die

---

<sup>62</sup> Projektanmeldungen von Privatpersonen waren im BVWP 2003 noch nicht möglich, dies spielt aber für die weitere Arbeit keine Rolle.

<sup>63</sup> Für weitere Informationen zur Bewertungsmethodik siehe BMVBW 2005.

neuen Vorhaben des vordringlichen und des weiteren Bedarfes Teil der Untersuchung.

Die La-Stellen sind mit den bisher in diesem Abschnitt verwendeten Quellen nicht zu erfassen. Sie sind verzeichnet in den „Zusammenstellungen der vorübergehenden Langsamfahrstellen und anderen Besonderheiten“, die insbesondere für die Triebfahrzeugführer relevant sind [Vgl. Heister 2005, S. 121]. Dabei handelt es sich allerdings um interne Dokumente der DB Netz, die nicht öffentlich zugänglich sind, sodass sie für diese Arbeit nicht zur Verfügung standen<sup>64</sup>. Als Ersatz dienen mehrere parlamentarische Anfragen der Fraktion Bündnis 90 / Die Grünen im Deutschen Bundestag [Vgl. Bundestag 2015, S. 4-7].

#### **5.2.4 Identifizierung der Engpässe**

Im ersten Schritt wurden aus den genannten Quellen sämtliche Engpässe zusammengetragen, die ihren Ursprung auf einer oder mehreren Kanten haben. Die Engpässe in Knoten, die in den Quellen genannt sind, treten ausschließlich bei sehr komplexen Knoten auf, sodass eine genaue Untersuchung an dieser Stelle nicht möglich ist. Ermittelt wurden neben der genauen Lage auch verschiedene Streckenparameter und der Status des Engpasses im BVWP 2003, soweit er dort aufgeführt ist. Für die Erfassung der Streckenparameter wurde der Eisenbahnatlas Deutschland<sup>65</sup> verwendet. Dabei ergab sich die Schwierigkeit, dass die Beschreibung der einzelnen Vorhaben im BVWP nur kurz in tabellarischer Form existiert und die Bewertungen der einzelnen Vorhaben nicht öffentlich sind. Auch die weiteren Quellen geben als Ursache lediglich fehlende Kapazitäten an, eine genaue Betrachtung des Problems findet nicht statt. Somit kann die Ursache des Engpasses nur aus Streckencharakteristika und den geplanten Abhilfemaßnahmen geschlossen werden. Erschwerend kommt hinzu, dass teilweise auch Strecken erfasst sind, die zwar momentan noch keine Kapazitätsprobleme haben, für die aber in Zukunft deutlich mehr Verkehre erwartet

---

<sup>64</sup> Bei Erstellung der Arbeit lag ein älteres Exemplar aus dem Jahre 2004 aus dem Regionalbereich Südost vor, das zumindest eine erste Einschätzung erlaubte.

<sup>65</sup> Siehe Schweers 2014



werden.<sup>66</sup> Ein Beispiel hierfür ist die Strecke von Oldenburg nach Wilhelmshaven, die eine leistungsfähige Anbindung des Jade-Weser-Ports schaffen soll. Der Infrastruktur- und Entwicklungsbericht der DB gibt in seiner Engpassübersicht keine genaue Modellierungs- oder Prognosemethodik an und ist daher nur begrenzt nachvollziehbar. Alle dort aufgeführten Engpässe stimmen aber mit mindestens einer der übrigen Quellen überein.

Ein Sonderfall sind die für überlastet erklärten Schienenwege: Ein Eisenbahninfrastrukturunternehmen kann einen Schienenweg für überlastet erklären, wenn „[...] der Nachfrage nach Zugtrassen auch nach Koordinierung der verschiedenen Anträge auf Zuweisung von Zugtrassen während bestimmter Zeitabschnitte nicht in angemessenem Umfang entsprochen werden kann“ [EIBV § 16]. Anschließend muss – falls noch nicht geschehen – eine Kapazitätsanalyse des betreffenden Abschnittes unter Beteiligung der betroffenen Verkehrsunternehmen durchgeführt werden und ein Plan zur Erhöhung der Schienenwegkapazität dem Eisenbahnbundesamt, der Bundesnetzagentur und den betroffenen Bundesländern vorgelegt werden [Vgl. EIBV §§ 17, 18].

Für die zweigleisigen Strecken wird grundsätzlich eine hohe bis sehr hohe Belastung der Kante unterstellt, auch wenn die genaue Ursache des Engpasses nicht feststeht. Dies ergibt sich entweder aus der Ausbauplanung des BVWP, die für alle dort genannten zweigleisigen Engpässe einen Neu- oder Ausbau mit zusätzlichen Gleisen vorsieht [Vgl. BMVBW 2003, S. 55 ff.], oder aus den Berechnungsmethoden der übrigen Quellen, die zwar verschiedene Verfahren nutzen, aber letztlich immer eine zu geringe Kapazität für die jeweiligen Abschnitte festgestellt haben. Alle zweigleisigen Kantenengpässe finden sich in Anhang 6. Die eingleisigen Strecken sind in dieser Hinsicht anders zu bewerten: Nur wenige Engpässe resultieren aus einer aktuellen Überlastung, in den meisten Fällen sollen leistungsfähige Alternativrouten für den Güterverkehr geschaffen werden, wie zum Beispiel mit der Verbindung Löhne – Elze [Vgl. Birn/Mann 2010, S. 9-1]. Eine Tabelle der eingleisigen Engpässe befindet sich in Anhang 7.

---

<sup>66</sup> Für das Prognosemodell des BVWP siehe BMVBW 2005, S. 104-121, für die Überprüfung des Bedarfsplans siehe Birn/Mann 2010, S. 4-1 - 4-11, für die UBA-Studie siehe Holzhey 2010, S. 52-64.

Zusätzlich gibt es einige Spezialfälle: Dies sind zum einen diejenigen Strecken, die bereits heute mehr als zwei Gleise haben.<sup>67</sup> Zum anderen gehören dazu die Strecken, die abschnittsweise eine unterschiedliche Anzahl an Gleisen haben. Diese Sonderfälle sind im Anhang 8 aufgeführt. Aufgrund ihrer geringen Anzahl werden sie nicht weiter betrachtet.

Zum 1. Februar 2015 weist das Schienennetz, welches von der DB Netz verantwortet wird, 72 La-Stellen auf, die durch Mängel in der Infrastruktur begründet oder behördlich verordnet sind. [Vgl. Bundestag 2015, S. 4-7]. Dabei werden nur jene La-Stellen berücksichtigt, deren Beseitigungsdatum nach dem 1. April 2015 liegt bzw. noch unklar ist. In Summe ergibt dies 66 La-Stellen, welche im Anhang 9 aufgeführt sind. Ferner konnte eine Auflistung von zwölf weiteren La-Stellen ermittelt werden, welche in den Jahresfahrplan 2014 übernommen wurden und damit offiziell nicht mehr als La-Stelle aufgeführt werden [Vgl. Bundestag 2014, Tabelle 2]. Eine Liste dieser La-Stellen befindet sich ebenfalls in Anhang 9. Hieraus geht wiederum hervor, dass La-Stellen in den Jahresfahrplan der nächsten Fahrplanperiode aufgenommen werden können und davon seitens der DB Netz auch Gebrauch gemacht wird. Leider liegen trotz intensiver Recherche keine Erkenntnisse darüber vor, wie sich dies in den Jahren vor 2014 entwickelt hat. Über die La-Stellen hinaus, die tatsächlich als solche ausgewiesen sind, ist es im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich, Stellen im Eisenbahnnetz zu identifizieren, an denen Geschwindigkeitseinbrüche vorhanden sind. Dazu wären sehr detaillierte Streckendaten nötig, die jedoch nicht vorliegen.

### 5.2.5 Engpasskategorien

Aus den bisherigen Überlegungen wurden vier Engpasskategorien abgeleitet:

- Hochbelastete Kanten
- Hochbelastete Knoten
- La-Stellen
- Eingleisige Strecken

---

<sup>67</sup> Streng genommen gibt es keine Strecken mit mehr als zwei Gleisen. Bei einer viergleisigen Strecke handelt es sich zumeist um zwei zweigleisige Strecken mit jeweils eigener Streckennummer. Im Rahmen dieser Arbeit werden diese Abschnitte aber als eine Strecke gezählt. [Vgl. Pacht 2013a, S. 7 f.]

In die Kategorie „Hochbelastete Kanten“ fallen alle zweigleisigen Engpässe. Der Fokus der Untersuchung liegt auf den geplanten Überholungen von Güterzügen durch schnellere Personenzüge bzw. der Behinderung von schnellen durch langsame Züge. Die Problematik der Kapazitätsbeschränkung, die die Zahl der möglichen Trassen limitiert, wird nicht weiter verfolgt, da sie keine direkten Auswirkungen auf die Energieverbräuche hat.

Engpässe auf Knoten sind nur sehr schwer zu erfassen, da sie im Gegensatz zu den Engpässen auf Kanten sehr vielfältig und noch stärker von den jeweiligen Infrastruktureigenschaften abhängig sind. [Vgl. Bendfeldt 2005, S. 18]. Daher werden im Weiteren keine konkreten Engpässe verwendet, sondern in der Modellierung ein typischer Knoten entwickelt, um die Komplexität der Analyse im Rahmen zu halten.

Die Kategorie der La-Stellen als Sonderfall eines Kantenengpasses wurde bereits ausführlich beschrieben. Da La-Stellen in der Regel sehr spezifische Ursachen haben und im Gegensatz zu den Kantenengpässen örtlich begrenzt sind, werden sie in eine eigene Kategorie gefasst.

Die erfassten eingleisigen Strecken bilden ebenfalls eine eigene Kategorie. Unter dem Gesichtspunkt der Energieeinsparung, fallen die Kreuzungshalte besonders ins Gewicht. Im Personenverkehr fällt der Kreuzungshalt fast immer mit einem Verkehrshalt zusammen, sodass daraus kein Energiemehrbedarf entsteht. Relevant sind hingegen Kreuzungshalte von Güterzügen, die aufgrund ihrer großen Masse hohe Energieverbräuche beim Anfahren haben (siehe auch Kapitel 3).

## 6 Maßnahmenkatalog Infrastrukturausbau

Es existiert eine Vielzahl an Beiträgen und Publikationen<sup>68</sup> für infrastrukturelle Maßnahmen in verschiedensten Ausführungen, die zusammenfassend auf fünf Kernpunkte reduziert werden können:

- Neubau einer Strecke zur Entlastung bestehender Strecken
- Ausbau vorhandener Strecken mit mehr Gleisen, beispielsweise für eine erhöhte Flexibilität oder auch für eine Entmischung der Zugkategorien
- Ertüchtigung vorhandener Strecken für eine höhere Streckengeschwindigkeit
- Verbesserung der LST auf den vorhandenen Strecken, um kleinere Blocklängen zu ermöglichen
- Entfernung von niveaugleichen Kreuzungen von mind. zwei Strecken

Im Anhang 10 befindet sich eine Übersicht über alle recherchierten infrastrukturellen Maßnahmen.

Für die kostentechnische Betrachtung der einzelnen infrastrukturellen Maßnahmen wurden eine Studie des Deutschen Zentrums für Luft und Raumfahrt (DLR) sowie je eine Dissertation von der Universität Hannover und von der ETH Zürich verwendet.<sup>69</sup> Es soll mit Hilfe dieser drei Publikationen der passendste Wert für die jeweilige infrastrukturelle Maßnahme ermittelt werden. Dabei wird derjenige Wert verwendet, der das Kriterium der Nachvollziehbarkeit am

---

<sup>68</sup> Siehe auch Belter et al. 2008, BIHK 2012, Birn et al. 2006, BMVBW 2003, BMVI 2014, DB 2014c, DB Netz 2012, Holzey 2010, Nahverkehr Rheinland 2015, Pohl 2008; Siefer/Kollenberg 2007, VDV 2015

<sup>69</sup> Die Studie des DLR wird in dieser Arbeit mit dem Kurzbeleg *Eickmann et al. 2008* betitelt, die Dissertation der Uni Hannover ist unter dem Kurzbeleg *Lienau 2007* und die Dissertation der ETH Zürich ist unter dem Kurzbeleg *Frank 2013* aufzufinden.

besten erfüllt. Wenn keine der verwendeten Quellen dieses Kriterium erfüllt, wird einer der Werte ohne weitere Begründung verwendet.

In dieser Arbeit wird zusätzlich zu den reinen Investitionskosten auch ein pauschaler Kostensatz für Planungskosten in Höhe von 13 % der Investitionskosten angesetzt [Vgl. Eickmann et al. 2008, S. 109]. Die Summe aus diesen beiden Kostensätzen wird Baukosten genannt. Auf die Baukosten wird anschließend ein kalkulatorischer Zinssatz in Höhe von 8 % pro Jahr angesetzt, wie er auch bei der DB Netz gerechnet wird [Vgl. Lienau 2007, S. 29]. Zusätzlich werden noch die jährlich anfallenden Instandhaltungskosten berücksichtigt, die sich, soweit sie als Prozentsatz angegeben werden, auf die Investitionskosten beziehen.

Zwar können sich die Kosten für eine Regional-, Haupt- oder Hochgeschwindigkeitsstrecke unterscheiden, so wie es beispielsweise Frank in seiner Dissertation ausweist [Vgl. Frank 2013, S. 100-114], aber im Rahmen der Handhabbarkeit dieser Arbeit wird diese Unterscheidung nicht getroffen und stattdessen ein allgemeingültiger Wert verwendet.

Eine grundlegende Problematik besteht in der Unterscheidung zwischen technischer Lebensdauer und bilanzieller Nutzungszeit von Infrastruktur, welche deutlich voneinander abweichen können. Die technische Lebensdauer bezeichnet den Zeitraum, in dem die Infrastruktur – regelmäßige Wartung vorausgesetzt – zur Nutzung zur Verfügung steht, bevor sie ersetzt werden muss. Sie wird hauptsächlich zur Planung von Erneuerungs- und Instandhaltungsstrategien verwendet. Die bilanzielle Nutzungszeit ist die wirtschaftliche Seite der Betrachtung, welche sich in der Berechnung der Abschreibungskosten niederschlägt. Sie kann die technische Lebensdauer nicht überschreiten. [Vgl. Lienau 2007, S. 4 f.]

## 6.1 Einzelmaßnahmen

Es folgt eine detaillierte Ausführung der recherchierten Maßnahmen sowie der verwendeten Kostensätze. Dabei werden verschiedene Komponenten des Bahnkörpers sowie Ingenieurbauwerke dargestellt. Der hohe Detaillierungs-

grad ist vor allem der Engpasskategorie der La-Stellen geschuldet, da diese eine sehr kleinräumige Betrachtung verlangen. Die Beschreibung der infrastrukturellen Maßnahmen für die geografisch weiträumigen Engpasskategorien wird in Kapitel 6.2 vorgenommen.

Eine Übersicht über die ermittelten Kostensätze findet sich in Tab. 21 auf der Seite 95.

### **6.1.1 Oberbau<sup>70</sup>**

Die Investitionskosten für einen Meter konventionellen Oberbau betragen im Mittel 500 EUR. Zusammen mit dem pauschalen Planungskostensatz von 13 % betragen die Baukosten 565 EUR/m. Die Instandhaltungskosten werden mit 5 EUR/m pro Jahr kalkuliert. Diese Werte werden in ähnlicher Form in allen drei Publikationen verwendet und können daher als korrekt angesehen werden. [Vgl. Eickmann et al. 2008, S. 109 f., Vgl. Lienau 2007, S. 42; Vgl. Frank 2013, S. 103].

Die technische Lebensdauer für den Oberbau ist nur schwer zu ermitteln, da eine Vielzahl von Faktoren die Lebensdauer des Oberbaus beeinflussen. [Vgl. Lienau 2007, S. 46 f.] Es wird daher versucht, mittels verschiedener Kennwerte eine allgemeine Aussage zu erstellen. Dazu werden die drei Komponenten Schiene, Schwelle und Bettung betrachtet. Für die Schiene kann von einer mittleren Lebensdauer von rund 40 Jahren ausgegangen werden [Vgl. Hempe 2006, S. 147]. Für die Schwellen werden Liegedauern von rund 45 Jahren angesetzt [Vgl. Schröder-Baumgart 1995, S. 166]. Die Bettung besitzt eine durchschnittliche Lebensdauer von rund 56 Jahren [Vgl. Lienau 2007, S. 47]. In dieser Arbeit wird für die technische Lebensdauer des Oberbaus der geringste der drei oben genannten Werte verwendet. In diesem Fall sind die 40 Jahre der Schiene der ausschlaggebende Wert.

---

<sup>70</sup> Der konventionelle Oberbau besteht aus mehreren Komponenten (Gleis mit Schienen, Schwellen, Schienenbefestigungen, ggf. Zwischenlagen und Schotterbett).

### 6.1.2 Untergrund/Unterbau<sup>71</sup>

Für die Investition in eine Untergrunderneuerung existieren nur Angaben vom DLR und von Frank. In der Studie des DLR werden 500 EUR/m angesetzt, während bei Frank die Angaben zwischen 750 EUR/m und 2.000 EUR/m schwanken. [Vgl. Eickmann et al. 2008, S. 109; Vgl. Frank 2013, S. 103] Da beide Angaben nur bedingt nachvollziehbar sind, wird der Wert der DLR-Studie verwendet. Die Baukosten betragen folglich 565 EUR/m.

Für die Instandhaltungskosten geben sowohl die Studie des DLR als auch Lienau keine Werte an, nur Frank kalkuliert mit 0,2 % der Investitionskosten. [Vgl. Eickmann et al. 2008, S. 110; Vgl. Lienau 2007, S. 133 f.; Vgl. Frank 2013, S. 103] Da die Mehrheit der verwendeten Autoren keine Instandhaltungskosten verwendet, wird in dieser Arbeit ebenfalls ohne Instandhaltungskosten für den Untergrund gerechnet.

Die Lebensdauer des Untergrundes wird von Lienau und Frank mit je 80 Jahren angegeben [Vgl. Lienau 2007, S. 134; Vgl. Frank 2013, S. 103].

### 6.1.3 Fahrleitung<sup>72</sup>

Für die Elektrifizierung geben die DLR-Studie 350 EUR/m, Lienau 108 EUR/m<sup>73</sup> und Frank zwischen 200-700 EUR/m als Investitionskosten an [Vgl. Eickmann et al. 2008, S. 109; Vgl. Lienau 2007, S. 121; Vgl. Frank 2013, S. 104]. Der Wert von Lienau ist deutlich niedriger im Vergleich zur DLR-Studie. Dazu muss gesagt werden, dass der Wert nach Lienau nur für die freie Strecke mit einer Nachspannung über drei Felder gilt. Die zusätzlichen Kosten für Weichen und Bahn-

<sup>71</sup> Zum Unterbau gehören die Schichten unterhalb des Erdplanums. Diese dienen zum Ausgleich von Unebenheiten im Erdgrund [Vgl. Frank 2013, S. 103]. Unterhalb des Unterbaus befindet sich der Untergrund. Zwischen beiden Ebenen befindet sich das Untergrundplanum.

<sup>72</sup> Die Fahrleitung und ihre Funktion wird im Kapitel 2.1.4 beschrieben.

<sup>73</sup> Der Wert basiert auf folgenden Angaben: Die Nachspannlänge einer Oberleitung auf der freien Strecke beträgt 1.500 m. Der Mastabstand beträgt 75 m. Ein Tragmast mit Einfachausleger kostet 6.000 EUR, mit Doppelausleger 7.000 EUR pro Stück. Ein Abspannmast mit Doppelausleger kostet 11.000 EUR. In einer Nachspannlänge befinden sich gut 20 Masten, davon sind zwei Masten Abspannmasten mit Doppelausleger, vier Masten sind Tragmaste ebenfalls mit Doppelausleger, 14 Masten sind Tragmaste mit Einfachausleger. Zusätzlich muss an beiden Enden einer Nachspannung die Kettenwerksabspannung mit je 3.000 EUR berücksichtigt werden. Das Kettenwerk wird mit 15 EUR/m angesetzt. Zusammen ergibt dies Gesamtkosten von 162.500 EUR für 1.500 m Länge, bzw. rund 108 EUR/m. [Vgl. Lienau 2007, S. 121 f.]

hofsanlagen sind dabei nicht berücksichtigt. Der Wert der DLR-Studie liegt im Mittel zwischen den beiden anderen Extremwerten. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit mit Investitionskosten von 350 EUR/m gerechnet, zumal auch der Richtwertkatalog der DB Netz von rund 350 EUR für einen Meter Fahrleitung vom Typ Re250 ausgeht [Vgl. Lienau 2007, S. 118]. Die Baukosten für einen Meter Fahrleitung betragen entsprechend 396 EUR.

Für die Instandhaltung der Fahrleitung werden in der DLR-Studie 2 EUR/m pro Jahr angesetzt, was dem Richtwertkatalog der DB Netz entspricht und sowohl von Lienau als auch in Teilen von Frank bestätigt wird [Vgl. Eickmann et al 2008, S. 110; Vgl. Lienau 2007, S. 123; Vgl. Frank 2013, S. 104].

Bezüglich der Lebensdauer von Fahrleitungen existiert einzig die Angabe von Frank mit 40 Jahren. [Vgl. Frank 2013, S. 104].

#### **6.1.4 Weichen**

Für einen Weichenneubau kalkuliert die DLR-Studie mit 200.000 EUR Investitionskosten, Lienau gibt für eine 1.200er-Weiche<sup>74</sup> rund 227.500 EUR an<sup>75</sup> und bei Frank kostet eine Weiche zwischen 150.000-500.000 EUR. [Vgl. Eickmann 2008, S. 109; Vgl. Lienau 2007, S. 102 f.; Vgl. Frank 2013, S. 105] Große Weichen, wie beispielsweise die von Lienau angegebene 1.200er-Weiche, werden vor allem auf der freien Strecke eingebaut, da sie eine abzweigende Geschwindigkeit von 100 km/h erlauben [Vgl. Lichtberger 2010, S. 382]. Da in Bahnhöfen und Bahnhofsvorfeldern deutlich kleinere Weichen verbaut werden, die auch weniger kosten,<sup>76</sup> kann der vom DLR angegebene Pauschalwert als passend angenommen werden. Zusammen mit dem Planungskostensatz von 13 % betragen die Baukosten für einen Weichenneubau 226.000 EUR.

Auch bei der Instandhaltung gehen die Werte der einzelnen Publikationen zum Teil weit auseinander. So setzt die DLR-Studie 3.500 EUR, Lienau 2.500 EUR und

---

<sup>74</sup> Diese Bezeichnung steht für eine Weiche, bei dem das abzweigende Gleis einen Radius von 1.200 Metern aufweist.

<sup>75</sup> Der Wert setzt sich aus der Länge einer 1.200er Weiche von ca. 65 m und einem vom Lienau angegebenen Weichenmeterpreis in Höhe von rund 3.500 EUR/m zusammen [Vgl. Lienau 2007, S. 102 f.].

<sup>76</sup> So kostet eine 500er Weiche mit gut 42 m Länge nach Lienau rund 150.000 EUR [Vgl. Lichtberger 2010, S. 382].



Frank zwischen 4.300-6.000 EUR pro Jahr und Stück an. [Vgl. Eickmann 2008, S. 110; Vgl. Lienau 2007, S. 103; Vgl. Frank 2013, S. 105]. Da einzig die Angabe von Lienau nachvollziehbar ist, wird in dieser Arbeit ein jährlicher Instandhaltungskostensatz in Höhe von 2.500 EUR pro Weiche verwendet.

Die wirtschaftliche Lebensdauer einer Weiche wird seitens der DB mit rund 20 Jahren angegeben. Die technische Lebensdauer liegt nach Lienau deutlich darüber. Dieser verwendet einen Wert, ähnlich wie beim Oberbau, von rund 35 Jahren. [Vgl. Lienau 2007, S. 118] Da die Lebensdauer aber von der täglichen Belastung abhängig ist und in dieser Arbeit eher Strecken betrachtet werden, die ein hohes bis sehr hohes Streckenaufkommen aufweisen, wird in dieser Arbeit eine durchschnittliche Lebensdauer einer Weiche von 25 Jahren verwendet.

### **6.1.5 Sicherungstechnik<sup>77</sup>**

Die einzelnen Investitionskosten der unterschiedlichen LST-Komponenten müssen differenziert betrachtet werden. Daher wird nachfolgend zwischen der LST-Komponente Bahnübergang und der reinen Signaltechnik unterschieden.

#### **6.1.5.1 Bahnübergang beschränken**

Für die Beschränkung eines Bahnübergangs (BÜ) existieren nur Kostenangaben seitens der DLR-Studie sowie von Lienau. Die Angaben der beiden Quellen weisen bezüglich der Investitionskosten eine hohe Spannweite auf. Während in der DLR-Studie die Beschränkung eines BÜ mit 300.000 EUR veranschlagt ist, gibt Lienau Investitionskosten in Höhe von 450.000 EUR an. [Vgl. Eickmann 2008, S. 109; Vgl. Lienau 2007, S. 127] Ein Praxisbeispiel in der Stadt Wieblingen weist Kosten in Höhe von 500.000 EUR für die Erneuerung des BÜ aus [Vgl. Popanda 2014]. Auch die DB selbst gibt die Beschränkung eines BÜ mit ca. 500.000 EUR an [Vgl. DB 2015c]. Damit erscheint der Ansatz von Lienau realistischer. Zusammen mit den 13 % Planungskosten ergeben sich 508.500 EUR Baukosten für einen BÜ.

---

<sup>77</sup> Zur LST gehören neben den einzelnen Signalarten (z.B. Vor- und Hauptsignal) u.a. auch die Verkabelung, Gleisfreimeldeanlagen, Komponenten zur Sicherung von Bahnübergängen (BÜ) sowie Anlagen der Telekommunikation.

Bezüglich der Instandhaltungskosten stimmen sowohl das DLR als auch Lienau überein. Es wird daher der Kostensatz des DLR mit 4.500 EUR pro Stück und Jahr verwendet [Vgl. Eickmann et al. 2008, S. 110; Vgl. Lienau 2007, S. 127 f.].

Die Lebensdauer für einen technisch gesicherten BÜ beträgt nach Lienau im Mittel 20-25 Jahre, wobei die Einzelwerte der unterschiedlichen BÜ stark schwanken. Für nichttechnisch gesicherte BÜ ergibt sich eine mittlere Lebensdauer von 24 Jahren. [Vgl. Lienau 2007, S. 130] Ein weiterer Aspekt liegt in der Analyse der Lebensdauer von sensiblen Komponenten des BÜ. So ist beispielsweise eine Schranke die einzige Komponente, die bewegt wird. Die technische Lebensdauer einer Metallschranke, welche verzinkt und mit Kunststoff ummantelt ist, beträgt zwischen 30 und 40 Jahre [Vgl. IEMB 2006, S. 7]. Für die dort verwendete Motorentechnik konnte kein entsprechender Wert ermittelt werden. Da keine anderen allgemeingültigen Angaben recherchiert werden konnten, wird in dieser Arbeit die Angabe von Lienau verwendet. Damit beträgt die technische Lebensdauer eines BÜ in dieser Arbeit 25 Jahre, ungeachtet ob dieser technisch gesichert ist oder nicht.

#### **6.1.5.2 Signaltechnik**

Für den Neubau eines Signals, inklusive der Verkabelungsarbeiten und dem Hinzufügen zum Stellwerk, werden in der DLR-Studie Investitionskosten in Höhe von 500.000 EUR angesetzt [Vgl. Eickmann et al. 2008, S. 109]. Lienau dagegen berechnet seine Kosten für einzelne Signale. So kostet ein Haupt- oder Mehrabschnittssignal ca. 105.000 EUR, ein Vorsignal rund 40.000 EUR. Damit sind aber nur die Kosten für die Aufstellung eines Signals genannt. Die Kosten für die Installation und Verknüpfung mit dem Stellwerk nennt Lienau nicht. [Vgl. Lienau 2007, S. 68 f.] Dafür kalkuliert Frank in seiner Dissertation die Verkabelungsarbeiten für LST mit gut 300.000 EUR/km [Vgl. Frank 2013, S. 103]. Zusammen mit seinen Angaben von rund 100.000 EUR für eine Stelleinheit Signal, ergibt dies im Ansatz den von Eickmann genannten Wert [Vgl. Frank 2013, S. 105]. In dieser Arbeit wird daher der in der DLR-Studie genannte Wert von

500.000 EUR Investitionskosten pro Signal verwendet. Die Baukosten belaufen sich damit auf 565.000 EUR/Stück.

Die Instandhaltungskosten werden in der DLR-Studie mit jährlich 2.250 EUR pro Stück angegeben, Lienau gibt keine Werte für die Instandhaltung an und Frank verwendet prozentuale Kostenangaben zwischen 3-6 % für die Stelleinheit Signal, was zu Kostensätzen von rund 3.000-6.000 EUR führt [Vgl. Eickmann et al. 2008, S. 110; Vgl. Frank 2013, S. 105]. Die Problematik besteht wieder in dem Umstand, dass in beiden Publikationen die Nachvollziehbarkeit der genannten Werte nur eingeschränkt möglich ist. Auf dieser Grundlage werden pauschale Instandhaltungskostensätze in Höhe von 3.000 EUR pro Stück und Jahr angesetzt.

Sowohl für die Lebensdauer der signaltechnischen Komponenten, als auch für die Verkabelung existieren nur Angaben von Lienau. Für Signale werden 30 Jahre und für die Verkabelung werden 50 Jahre angesetzt. [Vgl. Lienau 2007, S. 50]

### **6.1.6 Brücken**

Für die Kostenkalkulation einer Brücke können nur Angaben vom DLR sowie von Lienau verwendet werden. Die DLR-Studie rechnet mit Investitionskosten in Höhe von 27.500 EUR pro laufenden Meter<sup>78</sup>, während Lienau 5.000 EUR/m<sup>2</sup> verwendet [Vgl. Eickmann 2008, S. 109; Vgl. Lienau 2007, S. 142]. Da das Regeltraumprofil mit einer Breite von fünf Metern definiert ist,<sup>79</sup> ergibt dies mit dem Kostenansatz von Lienau Investitionskosten von 25.000 EUR für den laufenden Meter. Da beide Werte nah beieinander liegen, werden die Investitionskostenangaben des DLR verwendet. Zusammen mit den 13 % Planungskosten ergeben sich damit Baukosten von 31.075 EUR/m.

Da zu den Instandhaltungskosten seitens der DLR-Studie keine Angaben gemacht werden, verbleibt nur der Ansatz von Lienau, welcher 1 % der Investiti-

---

<sup>78</sup> Die Einheit Längenmeter bezieht sich auf einen Meter Länge einer eingleisigen Brücke.

<sup>79</sup> Die Angabe von fünf Metern basieren auf der EBO und gelten für durchgehende Hauptgleise sowie anderen Hauptgleisen für Reisezüge [Vgl. Schmitt/Jäntsche 2013, S. 312 ff.]

onskosten ansetzt [Vgl. Lienau 2007, S. 142 f.]. Damit betragen die jährlichen Instandhaltungskosten 275 EUR/m.

Abhängig vom Material kann die technische Lebensdauer einer Brücke nach Lienau bis zu 110 Jahre betragen. Er selbst geht dabei von einer allgemeinen Lebensdauer von 90 Jahren aus [Vgl. Lienau 2007, S. 143]. Diese Annahmen werden in dieser Arbeit übernommen.

### **6.1.7 Tunnel**

Für einen Tunnel sind seitens der DLR-Studie keine Werte angegeben. Lienau gibt für einen 2-gleisigen Tunnel in bergmännischer Bauweise einen pauschalen Meterpreis von 30.000 EUR/m an. Da heutzutage nur noch eingleisige Röhren erlaubt sind, reduziert sich der Wert auf 18.400 EUR/m. [Vgl. Lienau 2007, S. 139 f.] Frank verwendet einen Wert von 400 EUR/m<sup>3</sup> [Vgl. Frank 2013, S. 110]. Wird dies auf einen Laufmeter Tunnel umgerechnet ergibt sich ein Wert von rund 16.875 EUR/m<sup>80</sup>. Damit ist die Differenz zwischen Lienau und Frank relativ klein. Es wird daher der Kostensatz von Lienau verwendet. Zusammen mit den Planungskosten ergeben sich somit 20.792 EUR/m Baukosten.

Für die Instandhaltungskosten setzen sowohl Lienau als auch Frank 0,1 % der Investitionskosten an [Vgl. Lienau 2007, S. 140; Vgl. Frank 2013, S. 110]. Dieser Wert ist nicht vollkommen nachvollziehbar, wird aber auch in anderen Publikationen verwendet [Vgl. Frank 2013, S. 110]. Die Instandhaltungskosten für einen Tunnel betragen folglich gut 30 EUR/m pro Jahr für 2-gleisige Tunnel und rund 18 EUR/m pro Jahr für eingleisige Tunnel.

Die Lebensdauer eines Tunnels wird seitens der DB mit 75 Jahren angegeben. Lienau verwendet aber die Aussagen aus seinen Experteninterviews, die eine durchschnittliche Lebensdauer von 130 Jahren angeben [Vgl. Lienau 2007, S. 140]. Frank macht keine Aussagen zur Lebensdauer. Daher werden die Aus-

---

<sup>80</sup> Das Volumen des Tunnels wurde mit einer Standardbreite eines eingleisigen Tunnels inklusive einem Randweg von 6,86 m und einer lichten Höhe von 6,15 m berechnet [Vgl. Schmitt/Jänsch 2013, S. 315-328]. Die 42,2 m<sup>3</sup> wurden anschließend mit dem Kostensatz von Frank multipliziert.

sagen der Experten auch in dieser Arbeit verwendet und die Lebensdauer mit 130 Jahren kalkuliert.

### **6.1.8 Personenunterführung**

Eine Personenunterführung (PU) besteht aus einem Tunnelement sowie den dazugehörigen Zugängen, wie beispielsweise Treppen oder auch Aufzügen. Die Reihenfolge der betrachteten Elemente gestaltet sich wie folgt: Zuerst werden die Tunnel für die PU betrachtet, anschließend die Personentreppen und am Ende das Element Aufzug. Dabei existieren von Seiten der DLR-Studie keine Angaben. Damit verbleiben Lienau und Frank als Quelle.

#### **6.1.8.1 Tunnelement**

Da der Richtwertkatalog der DB für eine PU in der Einheit Quadratmeter rechnet, gibt auch Lienau seinen Kostensatz in dieser Einheit an. So kalkuliert er mit rund 9.000 EUR/m<sup>2</sup>. Frank hingegen verwendet Kubikmeter als Bezugseinheit und weist einen Kostensatz in Höhe von 720 EUR/m<sup>3</sup> aus. [Vgl. Lienau 2007, S. 148 f.; Vgl. Frank 2013, S. 110] Beide Kostensätze sollen zur besseren Vergleichbarkeit auf die Einheit Quadratmeter umgerechnet werden. Dafür wird eine lichte Breite von 2,5 m angenommen [Vgl. DB Netz 813.0202 2012, Abschnitt 9 (2)]. Für Frank ergibt sich damit ein Quadratmeterpreis in Höhe von 1.800 EUR/m<sup>2</sup>. Es zeigt sich, dass die Kostenangabe von Lienau 500 % über der von Frank liegt. Erst bei einer Tunnelbreite von ca. 12,5 m ergäbe dies einen gleichen Quadratmeterpreis. Da aber die Argumentation von Lienau nachvollziehbarer ist, wird sein Kostensatz verwendet. Die Baukosten für einen Quadratmeter PU betragen somit 10.170 EUR/m<sup>2</sup>.

Für die Instandhaltungskosten verwendet Lienau 0,4 % der Investitionskosten, während Frank 0,1 % angibt [Vgl. Lienau 2007, S. 150; Vgl. Frank 2013, S. 110]. Da auch der Investitionskostensatz von Lienau verwendet wurde, werden auch seine Angaben bezüglich der Instandhaltungskosten übernommen. Diese betragen damit 36 EUR/m<sup>2</sup>.

Die Lebensdauer der PU geben sowohl Lienau als auch Frank mit 75 Jahren an [Vgl. Lienau 2007, S. 150; Vgl. Frank 2013, S. 110].

#### **6.1.8.2 Treppenelement**

Für eine Treppe verwendet Frank einen pauschalen Kostensatz. Die mittleren Investitionskosten betragen dabei 225.000 EUR pro Treppe [Vgl. Frank 2013, S. 111]. Lienau verwendet ebenfalls einen pauschalen Kostensatz mit 165.000 EUR. Da die Nachvollziehbarkeit bei Lienau eher gegeben ist als bei Frank, wird der Kostensatz von Lienau verwendet. Die Baukosten für eine Treppe betragen folglich 186.450 EUR.

Die Instandhaltungskosten liegen bei Lienau wieder bei 0,4 % der Investitionssumme. Darauf aufbauend betragen die Instandhaltungskosten 660 EUR pro Jahr. Frank hingegen gibt pauschal 900 EUR an. [Vgl. Lienau 2007, S. 150; Vgl. Frank 2013, S. 111] Mit der gleichen Begründung wie auch in Kapitel 6.1.8.1 wird in dieser Arbeit der Kostensatz von Lienau genutzt.

Die technische Lebensdauer einer Treppe wird gleich hoch angenommen wie die von Tunneln, in diesem Fall also mit 75 Jahren [Vgl. Lienau 2007, S. 150] Dieser Wert wird auch bei Frank verwendet [Vgl. Frank 2013, S. 111]

#### **6.1.8.3 Aufzug**

Ein Aufzug wird bei Lienau pauschal mit 200.000 EUR Investitionskosten angegeben, dieser Wert findet sich auch bei Frank wieder [Vgl. Lienau 2007, S. 147; Vgl. Frank 2013, S. 111]. Die Baukosten für einen Aufzug betragen somit 226.000 EUR/Stück.

Die Instandhaltungskosten für die Aufzüge gibt Lienau mit 3,78 % der Investitionskosten an, Frank verwendet rund 4 % [Vgl. Lienau 2007, S. 148, Vgl. Frank 2013, S. 111]. Beide Werte liegen nah beieinander. Da das Kriterium Nachvollziehbarkeit bei Frank auch für den Aufzug nicht erfüllt ist, wird die Angabe von Lienau verwendet. Damit ergeben sich jährliche Instandhaltungssätze von rund 7.560 EUR/Aufzug.

Die Lebensdauer eines Aufzugs wird bei Lienau und Frank mit je 15 Jahren angegeben. [Vgl. Lienau 2007, S. 148 ff.; Vgl. Frank 2013, S. 111].

### **6.1.9 Bahnhofselemente**

Wie im Kapitel 6.1.8 bestehen auch hier nur Werte von Lienau und Frank. Für die Bahnhofselemente unterscheidet Lienau zwischen Bahnsteigkante und der Oberfläche des Bahnsteiges. Für die Bahnsteigkante wird mit einem Investitionskostensatz von 750 EUR/m gerechnet, für die Bahnsteigoberfläche werden 275 EUR/m<sup>2</sup> angesetzt [Vgl. Lienau 2007, S. 144]. Auch Frank verwendet exakt die gleichen Werte [Vgl. Frank 2013, S. 108]. Die Baukosten ergeben somit 848 EUR/m für die Bahnsteigkanten und 311 EUR/m<sup>2</sup> für die Bahnsteigoberfläche.

Die Instandhaltungskosten werden bei Lienau mit 0,3 % der Investitionskosten beziffert, bei Frank mit 0,1 % [Vgl. Lienau 2007, S. 145; Vgl. Frank 2013, S. 108]. Wieder wird die Angabe von Lienau verwendet, da die Nachvollziehbarkeit in seiner Publikation eher gegeben ist. Folglich ergibt dies für die Bahnsteigkante jährliche Instandhaltungskosten von 2,25 EUR/m und für die Oberfläche 0,83 EUR/m<sup>2</sup>.

Für die Lebensdauer von Bahnsteiganlagen verwendet Lienau einen technischen Betrachtungszeitraum von 70 Jahren [Vgl. Lienau 2007, S. 145]. Frank hingegen bezieht sich auf den Abschreibungszeitraum von 25 Jahren. Dieser erscheint Lienau aber als viel zu kurz. Diese Einschätzung wird in dieser Arbeit geteilt, weswegen der Wert von Lienau verwendet wird.

## **6.2 Zusammenfassende Maßnahmen**

Die zusammenfassenden Maßnahmen basieren auf den Einzelmaßnahmen aus Kapitel 6.1 und dienen einer einfacheren Kostenbetrachtung von Implementierungen großräumiger infrastruktureller Maßnahmen. Dabei werden die zusammenfassenden Maßnahmen für insgesamt drei Gruppen spezifiziert:

- Streckenelement
- Bahnhofselement
- Kunstbauwerke

### 6.2.1 Streckenelemente

Die Kategorie Streckenelement beinhaltet drei Unterkategorien. Die Neubausstrecke wird für eine völlig neu konzipierte und gebaute Strecke verwendet. Die Ausbaustrecke wird für bestehende Strecken angesetzt. Bei beiden Unterkategorien kommt, falls es notwendig wird, die dritte Unterkategorie Streckenknoten<sup>81</sup> zum Einsatz. Die Tab. 12 zeigt dabei die berücksichtigten Einzelmaßnahmen aus dem Kapitel 6.1 auf.

**Tab. 12: Berücksichtigte Einzelmaßnahmen für ein Streckenelement**

Einzelmaßnahme	Neubausstrecke	Ausbaustrecke	Streckenknotten
Oberbau	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Untergrund	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Oberleitung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Weichen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
LST	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Quelle: Eigene Darstellung

Die zuvor erläuterten Einzelmaßnahmen „Brücken“ und „Tunnel“ müssen aufgrund ihrer, im Vergleich zu den anderen Einzelmaßnahmen, deutlich geringeren Anzahl auch weiterhin gesondert betrachtet werden.

#### 6.2.1.1 Neubau- und Ausbaustrecke

Für einen Kilometer Gleis werden die Kostensätze des Oberbaus und des Untergrundes zusammengefasst. Somit ergibt sich folglich ein Baukostensatz in Höhe von 1.130.000 EUR/km pro Gleis. Die jährlichen Instandhaltungskosten werden mit 5.000 EUR/km angesetzt. Dazu kommen die Baukosten für eine Fahrleitung.

<sup>81</sup> In dieser Arbeit ist unter einen Streckenknoten eine Abzweigstelle oder auch eine Überleitstelle definiert (siehe auch Kapitel 6.2.1.2).



Nach Kapitel 6.1.3 betragen diese für einen Kilometer Strecke 396.000 EUR. Die Instandhaltungskosten belaufen sich dabei auf 2.000 EUR je Gleis und pro Jahr. Zusätzlich müssen noch die Baukosten für die LST berücksichtigt werden. Dazu wird ein mittlerer Signalabstand von drei Kilometern angenommen. Dabei sind folgende Annahmen zu beachten:

- Für eine eingleisige Strecke werden zwei Signale alle drei Kilometer angenommen, je ein Signal für je eine Fahrtrichtung. Mit den in Kapitel 6.1.5.2 angegebenen Baukostensätzen ergibt dies 376.667 EUR/km. Die Instandhaltung beträgt folglich 2.000 EUR/km je Gleis und pro Jahr.
- Auf einer zweigleisigen Strecke mit Zweirichtungsbetrieb und mit einer Blockteilung im Gegengleis alle sechs Kilometer werden durchschnittlich drei Signale alle drei Kilometer angenommen. (Vgl. Pachl 2013a, S. 10 f.) Die Baukosten betragen dabei 565.000 EUR/km, die jährlichen Instandhaltungskosten belaufen sich auf 3.000 EUR/km.

Die Tab. 13 zeigt zur besseren Übersicht alle ermittelten Bau- und Instandhaltungskosten auf.

**Tab. 13: Bau- und Instandhaltungskosten je Kilometer Streckenelement**

Kostenelement	Baukosten (ein Gleis) [EUR/km]	Instandhaltungskosten (ein Gleis) [EUR/km/a]	Baukosten (zwei Gleise) [EUR/km]	Instandhaltungskosten (zwei Gleise) [EUR/km/a]
Oberbau & Unterbau	1.130.000	5.000	2.260.000	10.000
Fahrleitung	396.000	2.000	792.000	4.000
LST	376.667	2.000	565.000	3.000
<b>Σ</b>	<b>1.902.667</b>	<b>9.000</b>	<b>3.617.000</b>	<b>17.000</b>

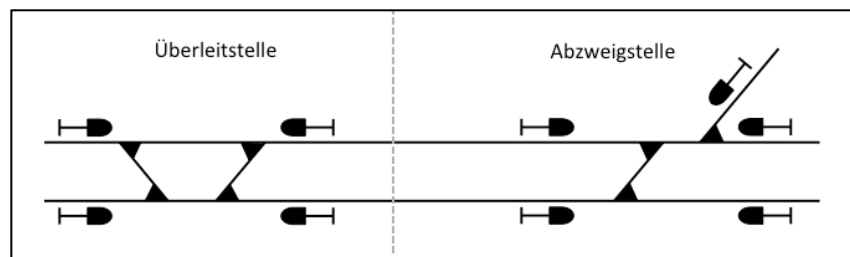
Quelle: Eigene Darstellung

Bezüglich der Lebensdauer einer Neu-/Ausbaustrecke wird der niedrigste Wert aus den drei Elementen Oberbau, Untergrund und Fahrleitung verwendet. Damit ergibt sich eine Lebensdauer von gut 40 Jahren (siehe auch die Kapitel 6.1.1 bis 6.1.3).

### 6.2.1.2 Streckenknoten

Für einen Streckenknoten wird auf die spezifische Angabe EUR/km verzichtet, da sie für einen punktuellen Knoten als nicht schlüssig erscheint. Stattdessen wird für eine Gesamtstrecke die Anzahl an Streckenknoten ermittelt und mit der entsprechenden Summe verknüpft. Beim Streckenknoten wird unterschieden zwischen Überleitstellen und Abzweigstellen (siehe Abb. 13).

**Abb. 13: Schematische Darstellung einer Überleit- und Abzweigstelle**



Quelle: Veränderte Darstellung nach: Pachl 2013a, S. 7

Für einen Streckenknoten sind vor allem die Weichen von elementarer Bedeutung. Die Anzahl an benötigten Weichen basiert auf der Art der Strecke. Bei einer eingleisigen Strecke mit einem eingleisigen Abzweig reicht eine Weiche aus. Bei einer zweigleisigen Strecke mit einem eingleisigen Abzweig werden bereits mindestens drei Weichen benötigt. Der in Kapitel 6.1.4 genannte Kostensatz ist ein Mittelwert über alle Arten von Weichen. Da auf der Strecke Weichen mit größeren Radien verbaut werden als in einem Bahnhof, wird der in jenem Abschnitt benannte Wert von Lienau für eine 1.200er Weiche verwendet. Damit betragen die Baukosten 257.075 EUR pro Weiche.

Ein zweiter und auch von der Kostenseite aus wichtiger Punkt ist die Anzahl der notwendigen Signale. In dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass alle Strecken auch im Gegengleis befahren werden können (siehe auch Kapitel 6.2.1.1). Somit sind für jedes Gleis zwei Signale notwendig, je eines für jede Richtung (siehe auch Abb. 13).

Eine Kostenzusammenfassung für den Typ Abzweigstelle findet sich in Tab. 14.

**Tab. 14: Kosten der Weichen für Streckenknoten, Typ Abzweigstelle**

Abzweigart	Anzahl an Weichen	Anzahl an Signalen	Baukosten [EUR]	Instandhaltungskosten [EUR/a]
1-gleisig zu 1-gleisig	1	3	1.952.075	11.500
2-gleisig zu 1-gleisig	3	5	3.596.225	22.500
2-gleisig zu 2-gleisig	4	6	4.418.300	28.000

Quelle: Eigene Darstellung

Für den Typ Überleitstelle findet die Kostenauflistung in Tab. 15 statt. Dabei zeigt sich, dass bei einer Überleitstelle die Baukosten je zusätzliches Gleis um 2.158.300 EUR und der Instandhaltungsaufwand um je 16.000 EUR/Jahr steigen. Der Grund liegt in dem linearen Mehrbedarf von je vier Weichen und zwei Signalen pro zusätzliches Gleis.

**Tab. 15: Kosten der Weichen für Streckenknoten, Typ Überleitstelle**

Streckenart	Anzahl an Weichen	Anzahl an Signalen	Baukosten [EUR]	Instandhaltungskosten [EUR/a]
2-gleisig	4	4	3.288.300	22.000
3-gleisig	8	6	5.446.600	38.000
4-gleisig	12	8	7.604.900	54.000

Quelle: Eigene Darstellung

Die Lebensdauer eines Streckenknotens basiert auch hier auf der geringsten Lebensdauer einer dort verbauten Komponente. In diesem Fall ist das die Weiche mit einer Lebensdauer von 25 Jahren (siehe Kapitel 6.1.4).

### 6.2.1.3 Sonderfall: Verbindungskurve

Eine Verbindungskurve kann ebenfalls als ein Abzweig bezeichnet werden, da auch hier entsprechende Weichenverbindungen notwendig sind. Die DLR-Studie gibt für eine Verbindungskurve einen pauschalen Investitionswert von 7,3 Mio. EUR pro Stück an [Vgl. Eickmann et al. 2008, S. 109]. Darin enthalten sind Ober- und Unterbauarbeiten, Weichen, LST-Komponenten sowie die Verkabelung. Die Baukosten für eine Verbindungskurve betragen entsprechend

8.249.000 EUR. Die kalkulatorischen Kosten müssen folglich mit 659.920 EUR/Jahr veranschlagt werden. Für die jährlichen Instandhaltungskosten kann mit 35.000 EUR geplant werden [Vgl. Eickmann et al. 2008, S. 110]. Setzt man alternativ die Kosten der Einzelmaßnahmen an, ergibt dies für eine rund 1,1 km lange und eingleisige Verbindungskurve<sup>82</sup> Gesamtinvestitionskosten in Höhe von 3,033 Mio. EUR und Instandhaltungskosten von rund 23.535 EUR pro Jahr. Bei einer ebenso langen 2-gleisigen Verbindungskurve betragen die Investitionskosten bereits ca. 5,16 Mio. EUR und die Instandhaltungskosten rund 37.000 EUR pro Jahr. Da die Kosten u.a. sehr von der Länge einer Verbindungskurve abhängig sind und es nicht möglich ist bei großräumigen Betrachtungen die einzelnen Längen einer jeden Verbindungskurve zu bestimmen, wird der pauschale Wert aus der DLR-Studie verwendet.

### **6.2.2 Bahnhofselemente (zusammengefasst)**

In der DLR-Studie werden zwei Arten von Begegnungsbahnhöfen aufgelistet: Ein Kreuzungsbahnhof, bei dem sich mind. zwei Strecken kreuzen, sowie ein Überholungsbahnhof mit einem seitlichen Gleis. Für letzteren werden Investitionskosten von pauschal 4 Mio. EUR kalkuliert, für den Kreuzungsbahnhof werden rund 6 Mio. EUR veranschlagt [Vgl. Eickmann et al. 2008, S. 109]. Die Baukosten für den Überholungsbahnhof betragen folglich 4.520.000 EUR, für den Kreuzungsbahnhof 6.780.000 EUR. Die Berechnungen der kalkulatorischen Zinsen ergeben für den Überholungsbahnhof 361.600 EUR/Jahr und für den Kreuzungsbahnhof 542.400 EUR/Jahr. Für die jährlich anfallenden Instandhaltungskosten werden für den Kreuzungsbahnhof 28.000 EUR und für den Überholungsbahnhof mit einem seitlichen Gleis 51.000 EUR angesetzt [Vgl. Eickmann et al. 2008, S. 110]. Alle Werte werden in dieser Arbeit übernommen, da eine Überprüfung der Kostenangaben ohne weitere Informationen, ähnlich wie bei der Verbindungskurve, nur sehr schwer durchführbar ist. Eine Angabe für eine technische Lebensdauer konnte nicht recherchiert werden.

---

<sup>82</sup> Als Beispiel wurde die Verbindungskurve der Strecke 6084 am Karower Kreuz verwendet.

### 6.2.3 Kunstbauten

Zu den Kunstbauten gehören Tunnel, Über- bzw. Unterführungen und auch Brücken. Nachfolgend wird die Kostenzusammensetzung erläutert. Die Lebensdauer wird für alle aufgelisteten Kunstbauten mit 90 Jahren angenommen (siehe Kapitel 6.1.6). Die nachfolgend aufgeführten Baukosten beinhalten dabei nur die reinen Brückenbaukosten. Die Baukosten für den Oberbau und die LST müssen zusätzlich berechnet werden.

#### 6.2.3.1 *Brücke über Kleingewässer*

Die Studie des DLR verwendet für eine Brücke über Kleingewässer<sup>83</sup> Investitionskosten von 300.000 EUR pro Brücke und Gleis [Vgl. Eickmann et al. 2008, S. 109]. Werden zu diesem Pauschalpreis die Meterkosten für eine Brücke aus Kapitel 6.1.6 hinzugezogen, ergibt dies eine Länge von rund 11 m. Für eine Brücke über ein Kleingewässer erscheint dies plausibel und kann daher in dieser Arbeit verwendet werden. Die Baukosten betragen somit 339.000 EUR und die jährlichen kalkulatorischen Zinsen 27.120 EUR.

Für die Berechnung der Instandhaltungskosten kommt der Kostensatz aus dem Kapitel 6.1.6 mit 1 % der Investitionskosten zur Anwendung. Für eine Brücke über Kleingewässer betragen die jährlichen Instandhaltungskosten somit pauschal 3.000 EUR.

#### 6.2.3.2 *Brücke über andere Schienenstrecken*

In dieser Arbeit wird von einer lichten Weite unter Überführungsbauwerken für eingleisige Strecken von 8 m und für zweigleisige Strecken von 12 m ausgegangen [Vgl. Schmitt/Jänsch 2012, S. 324]. Die Tab. 16 stellt die Investitions- und Instandhaltungskosten für verschiedene Kreuzungskonfigurationen dar. Die Kosten wurden dabei mit dem in Kapitel 6.1.6 verwendeten Kostensatz ermittelt, für zweigleisige Brücken wurde dieser verdoppelt.

---

<sup>83</sup> Zu Kleingewässer gehören u.a. Entwässerungsgräben sowie kleine, nicht schiffbare Bäche [Vgl. NABU o.J.].

**Tab. 16: Kosten Brückenkonfigurationen über andere Schienenstrecken**

Brückentyp	Typ der zu überquerenden Strecke	Baukosten [EUR]	kalk. Kosten [EUR/a]	Instandhaltungskosten [EUR/a]
1-gleisig	1-gleisig	248.600	19.888	2.200
1-gleisig	2-gleisig	372.900	29.832	3.300
2-gleisig	1-gleisig	497.200	39.776	4.400
2-gleisig	2-gleisig	745.800	59.664	6.600

Quelle: Eigene Darstellung

**6.2.3.3 Überwerfungsbauwerk für abzweigende Strecken**

Ein Überwerfungsbauwerk bei einer Abzweigung dient dazu den Betriebsfluss durch die Abzweigung möglichst wenig zu behindern. Dabei kreuzen sich zwei Strecken niveaufrei, d.h. die beiden Strecken befinden sich nicht auf gleicher Höhe. Ein klassisches Beispiel ist eine Brücke, die über ein anderes Gleis führt. In dieser Arbeit besteht das Überwerfungsbauwerk aus einer Verbindungskurve, einer eingleisigen Brücke über den zu kreuzenden Streckenabschnitt sowie einer weiteren, an die Brücke angeschlossenen Verbindungskurve. Für die Kosten der Verbindungskurve werden die Ansätze aus Kapitel 6.2.1.3 verwendet. Die Baukosten für das eigentliche Überwerfungsbauwerk basieren auf den Kostangaben der Kapitel 6.1.6 und 6.2.1.1. Die Länge eines Überwerfungsbauwerkes über eine zweigleisige Strecke beträgt 24 m<sup>84</sup> und kostet folglich 745.800 EUR. Die kalkulatorischen Zinsen betragen entsprechend 59.664 EUR pro Jahr. Die Instandhaltungskosten müssen mit 6.600 EUR im Jahr veranschlagt werden. Die Gesamtbaukosten eines Überwerfungsbauwerkes inklusive der zwei Verbindungskurven, werden in Tab. 17 aufgeführt.

<sup>84</sup> Die Länge von 24 m ergibt sich aus folgender Berechnung: Die lichte Breite bei einer orthogonalen Kreuzung beträgt 12 m (siehe Kapitel 6.2.3.2). In diesem Fall kreuzt die Überführung die zu kreuzende Strecke in einem Winkel von 60°. Durch die Berechnung nach den Winkelgesetzen ergibt sich für die überführende Strecke eine Länge von 24 m.

**Tab. 17: Kostensätze Überwerfungsbauwerk für abzweigende Strecke**

Komponente	Baukosten [EUR]	kalk. Zinsen [EUR/a]	Instandhaltungskosten [EUR/a]
1-gleisiges Überwerfungsbauwerk	745.800	59.664	6.600
2x Verbindungskurve	16.498.000	1.319.840	70.000
<b>Σ</b>	<b>17.243.800</b>	<b>1.379.504</b>	<b>76.600</b>

Quelle: Eigene Darstellung

#### 6.2.3.4 Straßenquerung

In der DLR-Studie wird für eine niveaufreie Straßenquerung ein Pauschalwert von 1 Mio. EUR pro Stück und pro Gleis angegeben [Vgl. Eickmann 2008, S. 109]. Eine Überprüfung der angegebenen Kosten ist nicht möglich, da diese nicht vollständig nachvollziehbar sind.<sup>85</sup> Die Angabe wird mangels Alternativen in dieser Arbeit übernommen. Damit betragen die Baukosten für eine Straßenquerung 1.130.000 EUR und die kalkulatorischen Zinsen müssen mit 90.400 EUR beachtet werden. Da keine Instandhaltungskosten angegeben werden, werden stattdessen die prozentualen Angaben für Brücken aus Kapitel 6.1.6 verwendet. Die Überführung verursacht entsprechend 10.000 EUR Instandhaltungskosten pro Jahr.

### 6.3 Zuordnung der Baumaßnahmen zu Engpasskategorien

Bisher wurden reine Baumaßnahmen ohne Bezug zu den in Kapitel 5 definierten Engpasskategorien besprochen. Einige Baumaßnahmen sind sehr spezifisch und werden daher nur bei einer Engpassursache angewandt. Andere wiederum sind sehr allgemein und benötigen eine genauere Erklärung, warum sie zur Beseitigung oder zumindest Linderung des Engpasses geeignet sind. Dieser Bezug wird in den nächsten Unterkapiteln erläutert.

<sup>85</sup> Es ist u.a. nicht ermittelbar wie lang die Straßenüberführung ist, welche Höhe und Breite sie aufweist und ob die Arbeiten zur Erstellung eines Straßenbelags ebenfalls mit betrachtet werden oder nicht.

### 6.3.1 Kantenengpässe

Im Bereich der Kanten stehen mehrere Möglichkeiten des Infrastrukturausbaus zu Verfügung, die in Tab. 18 zusammengefasst sind. Da das grundsätzliche Problem in der Verfügbarkeit von genügend Trassen besteht, sind die Lösungsmöglichkeiten für Kantenengpässe auf wenige Maßnahmen begrenzt. Eine häufig eingesetzte Maßnahme zur Kapazitätssteigerung ist die Blockverdichtung, beispielsweise in der Bedarfsplanmaßnahme Emmerich – Oberhausen [Vgl. Birn/Mann 2010, S. 9-140]. Die Blockabschnitte, in denen sich jeweils nur ein Zug befinden darf, werden verkürzt, sodass der nächste Zug schneller folgen kann und insgesamt mehr Züge die Strecke befahren können [Vgl. Pachl 2013a, S. 166]. Die Blockverdichtung kann noch durch den Einbau einer linienförmigen Zugbeeinflussung (LZB) oder ETCS verbessert werden [Vgl. Weigand 2009, S. 724 f.]<sup>86</sup>.

**Tab. 18: Ausbaumaßnahmen Kantenengpässe**

Ausbaumaßnahme	Energie-einsparung <sup>87</sup>	Kapazitäts-erhöhung
Blockverdichtung	(ja)	ja
Anhebung der Streckengeschwindigkeit	(ja)	ja
Gleisneubau	ja	ja

Quelle: Eigene Darstellung

Die Erhöhung der Streckengeschwindigkeit ohne weiteren Ausbau von Gleisen ist ebenfalls eine Möglichkeit der Engpassbehebung [Vgl. Warninghoff/Kerth 2012, S. 19], wie sie auch im Bedarfsplan des BVWP angewandt wird, beispielsweise auf der Ausbaustrecke München – Mühldorf [Vgl. Birn/Mann 2010, S. 8]. Da sowohl Blockverdichtung als auch Erhöhung der Streckengeschwindigkeit möglicherweise einen Einfluss auf den Traktionsenergieverbrauch haben, sind beide Maßnahmen hier aufgeführt. Eine systematische Untersuchung der Auswirkungen erfolgt aber im Rahmen dieser Arbeit nicht, da der Effekt als gering

<sup>86</sup> Zum Thema ETCS und Streckenleistungsfähigkeit siehe auch Eichenberger 2007

<sup>87</sup> Die Energieeinsparung für die ersten beiden Ausbaumaßnahmen wird angenommen, aber nicht geprüft. Daher stehen die Werte in Klammern.



eingeschätzt wird und eine detaillierte Analyse dieser Ausbaumaßnahmen den Rahmen der Arbeit überschreiten würde.

Wenn die Anzahl der Züge schon hoch ist und die Maßnahme der Blockverdichtung bereits angewandt wurde bzw. nicht genügend Kapazitätserweiterung verspricht, bleibt als Alternative nur der Bau von neuen Strecken, sei es direkt parallel zum bestehenden Engpass oder nicht. Wichtig ist, dass dieser Neubau den Anforderungen der bestehenden Verkehrsströme entspricht und damit tatsächlich eine Alternative zur bestehenden Strecke darstellt. Viele Ausbaumaßnahmen des BVWP haben einen Neubau von zusätzlichen Gleisen zum Ziel, um mehr Kapazitäten vor allem für Güterzüge zu schaffen, da ein weiterer Anstieg der Nachfrage nach Güterverkehrskapazitäten erwartet wird [Vgl. Birn/Mann 2010, S. 4-8 ff.].

Dabei muss beachtet werden, dass ein Ausbau der Kanten in vielen Fällen auch eine Anpassung der enthaltenen oder benachbarten Knoten beinhalten muss. Ansonsten besteht die Gefahr, dass der Engpass nur in die Knoten verlagert, aber nicht nachhaltig beseitigt wird.

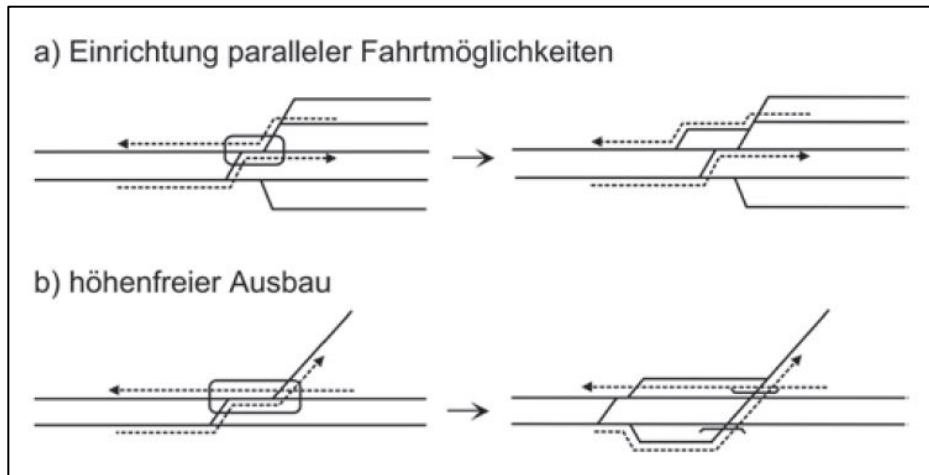
### **6.3.2 Knotenengpässe**

Für Knotenengpässe gibt es deutlich mehr Varianten, was in der Vielfalt der infrastrukturellen Gestaltung von Knoten begründet liegt. Grundproblematik der Knoten sind letztlich Fahrstraßenkonflikte (siehe Kapitel 5.2.2), die jedoch unterschiedliche Lösungsansätze haben können. Für einfache Bahnhofsbereiche sind oft kleinere Maßnahmen ausreichend, wie die Verlegung einer Weiche oder eines Signals. Dadurch können Fahrstraßenausschlüsse vermieden werden [Vgl. Pacht 2013a, S. 94 f.]. Weitere Varianten sind der Einbau zusätzlicher Weichen oder kurzer Gleisabschnitte, um beispielsweise eine gleichzeitige Aus- und Einfahrt zweier Züge zu ermöglichen (siehe Abb. 14, Abschnitt a).

Sollten diese Maßnahmen nicht ausreichen, kann der Bau eines Überwerfungsbauwerkes erwogen werden, wie es im Fall von stark belasteten Streckenverzweigungen oder Bahnhofseinfahrten häufig eingesetzt wird (siehe Abb. 14,

Abschnitt b). Da die Züge nach dem Ausbau nicht mehr dieselben Knotenelemente befahren, ist der potentielle Konfliktpunkt behoben. Der Nachteil einer solchen Lösung besteht neben den deutlich höheren Infrastrukturkosten im höheren Platzbedarf, der gerade in dicht bebauten Gebieten nur schwer zu erfüllen ist.

**Abb. 14: Behebung von Fahrstraßenkonflikten**



Quelle: Pacht 2013a, S. 150

In allen Fällen wird die Kapazität des Knotens erhöht [Vgl. Bendfeldt 1999, S. 38]. Auch der Nutzen der Energieeinsparung trifft für alle Ausbaumaßnahmen zu, da potentielle Behinderungen durch Fahrstraßenkonflikte behoben werden. Je nach Art und Komplexität des Knotens kann auch eine Kombination der vorgenannten Maßnahmen sinnvoll sein. In jedem Fall ist aber eine dezidierte Einzelfallbetrachtung notwendig. Die Tab. 19 zeigt eine Zusammenstellung dieser Ausbaumaßnahmen.

**Tab. 19: Ausbaumaßnahmen Knotenengpässe**

Ausbaumaßnahme	Energieeinsparung	Kapazitätserhöhung
Verschiebung von Weichen oder Signalen	ja	ja
Neubau von Weichen oder kurzen Gleisabschnitten	ja	ja
Überwerfungsbauwerk	ja	ja

Quelle: Eigene Darstellung

### 6.3.3 La-Stellen

Eine Ausnahme stellen die La-Stellen dar. Ihre Ursache ist so genau definiert, dass oft nur eine Möglichkeit der Behebung übrig bleibt. Aus diesem Grund erfolgt an dieser Stelle keine weitere Betrachtung, sondern es wird auf Kapitel 8.4 verwiesen, wo die Zuordnung der Baumaßnahmen zu den La-Stellen erfolgt.

### 6.3.4 Eingleisige Strecken

Die Ausbaumaßnahmen für eingleisige Strecken sind in Tab. 20 zusammengestellt. Hierbei müssen mehrere Fälle differenziert werden:

- Die Strecke bleibt eingleisig und es werden Kreuzungsstellen zu sog. Begegnungsstellen gebaut, die es zwei Zügen ermöglichen, ohne Geschwindigkeitsverlust aneinander vorbeizufahren („Fliegende Kreuzung“) [Vgl. Pachl 2013a, S. 201 f.]. Diese Begegnungsstellen sind prinzipiell nur ein verlängerter Kreuzungsbahnhof.
- Die Strecke bleibt eingleisig und es werden zusätzliche Kreuzungsstellen gebaut. Diese Maßnahme erhöht die Kapazität der Strecke [Vgl. Eickmann et al. 2008, S. 31-35], führt aber bei zunehmender Zugzahl zu mehr Halten durch Zugkreuzungen. Eine Energieeinsparung ist hier nicht zu erwarten, da das Problem des Zughaltes bei Zugkreuzungen nicht vermieden wird.
- Die Strecke wird zweigleisig ausgebaut. Diese Variante verlässt die Kategorie der Eingleisigkeit und führt unter Umständen zum Problem der Kantenengpässe. Über eine Energieeinsparung kann daher keine Aussage getroffen werden.

**Tab. 20: Ausbaumaßnahmen Eingleisige Strecke**

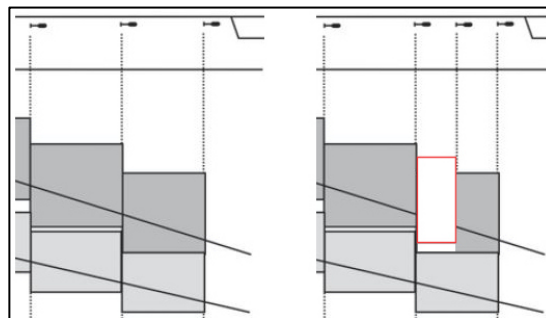
Ausbaumaßnahme	Energieeinsparung	Kapazitätserhöhung
Begegnungsstellen	ja	nein
Zus. Kreuzungsstellen	nein	ja
Zweigleisiger Ausbau	k.A.	ja

Quelle: Eigene Darstellung

## 6.4 Kritische Betrachtung und Zusammenfassung

Die Berücksichtigung des technisch aktuellen Standards beim Aus- und Neubau von Eisenbahnstrecken konnte durch die Verwendung von drei aktuellen Publikationen erfüllt werden. Da sie dem Stand der Technik entsprechen, können die hier vorgestellten infrastrukturellen Maßnahmen im Regelfall umgesetzt werden. Natürlich können lokale, z.B. topografische Bedingungen, die Umsetzung einzelner infrastruktureller Maßnahmen erschweren oder verhindern. Daher ist, um auch eine exakte Kostenaussage zu ermöglichen, immer eine Einzelfallbetrachtung notwendig.

**Abb. 15: Erhöhung der Streckenkapazität infolge kürzerer Blockabstände**



Quelle: Pacht 2013a, S. 180

Es sind auch die lokalen Gegebenheiten, die die Bauzeit stark beeinflussen. Da diese in einer großräumigen Betrachtung zu komplex werden, können sie nicht berücksichtigt werden. So gestalten sich zum Beispiel viele Schritte einer Baumaßnahme in Abhängigkeit der Topografie. Im Vergleich zum Bau einer vollständig neuen Strecke müssen beim Bau in einer Insellage andere Prozesse angewendet werden. Auch die betrieblichen Aspekte während der Bauzeit spielen eine Rolle. Wird eine Strecke für die Dauer der Baumaßnahmen vollständig gesperrt, gestalten sich diese deutlich kürzer im Vergleich zum Bauen während des laufenden Betriebes. Auch eine reine Verbesserung der Streckenkapazität<sup>88</sup> mittels einer Modernisierung der LST wird nicht im Einzelnen betrachtet. Begründet wird dies mit der hohen technischen Komplexität der LST, die den

<sup>88</sup> Der Begriff wird im Kapitel 5 ausführlich erläutert.

Rahmen dieser Arbeit überschritten hätte. Zweifellos muss diese Thematik für eine ganzheitliche Betrachtung mit berücksichtigt werden, da bei einem engen Blockabstand in Verbindung mit einem gleichbleibenden Fahrplan sich die verfügbaren Pufferzeiten vergrößern (siehe Abb. 15). [Vgl. Pachl 2013a, S. 180]

Abschließend werden zur besseren Übersicht nochmals alle benannten infrastrukturellen Maßnahmen mit ihren Kostensätzen und der jeweiligen veranschlagten Lebensdauer aufgelistet. Die Tab. 21 listet dabei die Einzelmaßnahmen auf, die Tab. 22 die zusammengefassten Maßnahmen. Ergänzend ist zu sagen, dass die hier aufgeführten Kosten idealisierte Werte darstellen, die in einer Einzelfallbetrachtung deutlich abweichen können.

**Tab. 21: Auflistung Einzelmaßnahmen**

Maßnahme	Einheit	Baukosten	kalk. Zinsen pro Jahr	IH-Kosten pro Jahr	Lebensdauer [in Jahre]
Oberbau	EUR/m	565	45	5,-	40
Untergrund/Unterbau	EUR/m	565	45	0,-	80
Fahrleitung	EUR/m	396	32	2,-	–
Weiche	EUR/Stück	226.000	18.080	2.500,-	25
Brücke	EUR/m	31.075	2.486	275,-	90
Tunnel	EUR/m	20.792	1.663	18,5	130
<b>Kategorie: Leit- und Sicherungstechnik</b>					
BU beschränken	EUR/Stück	508.500	40.680	4.500,-	25
Signaltechnik	EUR/Stück	565.000	45.200	3.000,-	30
<b>Kategorie: Personenunterführung</b>					
Personentunnel	EUR/m <sup>2</sup>	10.170	814	36,-	75
Treppe	EUR/Stück	186.450	14.916	660,-	75
Aufzug	EUR/Stück	226.000	18.080	7.560	15
<b>Kategorie: Bahnhofselemente</b>					
Bahnsteigkante	EUR/m	848	68	2,3	70
Bahnsteigoberfläche	EUR/m <sup>2</sup>	311	25	0,8	70

Quelle: Eigene Darstellung

Tab. 22: Auflistung zusammengefasste Maßnahmen

Maßnahme	Einheit	Baukosten	kalk. Zinsen pro Jahr	IH-Kosten pro Jahr	Lebensdauer [Jahre]
<b>Kategorie: Streckenelement</b>					
Neu-/Ausbau (eingleisig)	EUR/km	1.902.667	152.213	9.000	40
Neu-/Ausbau (zweigleisig)	EUR/km	3.617.000	289.360	17.000	40
Überleitstelle <sup>89</sup>	EUR/Stück	3.288.300	263.064	22.000	25
Abzweigstelle <sup>90</sup>	EUR/Stück	1.952.075	156.166	11.500	25
Verbindungskurve	EUR/Stück	8.249.000	659.920	35.000	25
<b>Kategorie: Bahnhofselement</b>					
Kreuzungsbahnhof	EUR/Stück	6.780.000	542.400	28.000	–
Überholbahnhof	EUR/Stück	4.520.000	361.600	51.000	–
<b>Kategorie: Kunstbauten</b>					
Brücke über Kleingewässer	EUR/Stück	339.000	27.120	3.000	90
Brücke über andere Schienenstrecken <sup>91</sup>	EUR/Stück	248.600	19.888	2.200	90
Überwerfungsbauwerk	EUR/Stück	17.243.800	1.379.504	76.000	90
Straßenquerung	EUR/Stück	1.130.000	90.400	10.000	90

Quelle: Eigene Darstellung

<sup>89</sup> Die Kostenangaben gelten für die einfachste Form der Überleitstelle. Weitere Kosten sind der Tab. 15 aufgeführt.<sup>90</sup> Die Kostenangaben gelten für die einfachste Form der Abzweigstelle. Weitere Kosten sind der Tab. 14 zu entnehmen.<sup>91</sup> Es wird wieder der kostengünstigere Fall angegeben. Die anderen Kostensätze sind in Tab. 16 zusammengefasst.

## 7 Modellierung der Engpässe

In den folgenden Kapiteln werden sämtliche Modellannahmen erläutert, die für die Umsetzung der ermittelten Engpässe in die Energieverbrauchsberechnung getroffen wurden. Da die Modellierung je nach Engpasskategorie sehr unterschiedlich ausfällt, muss sie für jede Kategorie gesondert erfolgen.

### 7.1 Berücksichtigung von Neigung, Bogenradien und Elektrifizierung

Der Bogenwiderstand (siehe Kapitel 3.1.1.2) fällt im Rahmen der Fahrzeugwiderstände kaum ins Gewicht, daher wird er in der Modellierung und Berechnung der Energieeinsparungen nicht berücksichtigt. Dagegen geht der Steigungswiderstand (siehe Kapitel 3.1.1.1) mit sehr viel größerem Anteil in die Fahrwiderstandsberechnung ein. Die Beseitigung von Steigungen besitzt also ein großes Energieeinsparpotential. Die in Kapitel 6 beschriebenen Infrastrukturmaßnahmen sind jedoch kaum in der Lage, an dieser Größe eine entscheidende Änderung hervorzurufen, da die Neigungsverhältnisse der Trassierung unverändert bleiben. Die meisten Engpässe liegen in Gebieten mit wenig Steigung, besonders die viel von Güterzügen befahrenen Strecken. Ausnahmen hiervon sind beispielsweise die Geislinger Steige oder die Spessarttrampe, die allerdings beide nicht als Engpass im Sinne dieser Arbeit geführt werden. Hinzu kommt, dass kaum Streckendaten im Hinblick auf Neigungsverhältnisse vorliegen, die im Modell hätten berücksichtigt werden können.

Den Gedanken aus dem vorigen Absatz weiterentwickelt, ist der Bau eines Baisstunnels und der damit verbundene Wegfall langer Strecken mit hohen Neigungen ein Ansatz zur Einsparung von Traktionsenergie. Da dies in Deutschland aber nur sehr wenig Anwendung findet, wird auf die Entwicklung eines entsprechenden Modells verzichtet.<sup>92</sup> Die Beispielstrecke in Kapitel 3.2 und alle weiteren Berechnungsschritte sind jedoch für die Berücksichtigung von Steigung und Bogenradien ausgelegt, sodass eine Anpassung leicht möglich ist, sofern die nötigen Werte vorliegen.

Bei vielen Engpassstellen der Kategorien La-Stelle und eingleisige Strecke handelt es sich um Strecken, die nicht elektrifiziert sind. Um eine korrekte Berechnung der Energieverbräuche zu gewährleisten, müsste ein zweites Energieberechnungsmodell für dieselbetriebene Fahrzeuge entwickelt werden. Da auf diesen Strecken im Vergleich zu den übrigen Engpässen deutlich weniger Züge verkehren und damit die Bedeutung für den Gesamtenergieverbrauch klein ist, wird im Sinne einer Vereinfachung des Modells eine bereits vorhandene Elektrifizierung dieser Strecken unterstellt.

## 7.2 Betriebsprogramm

Einer der entscheidenden Eingabeparameter für die Modellierung der Engpässe und Lösungsmöglichkeiten ist ein vorher definiertes Betriebsprogramm. Das Betriebsprogramm einer Strecke ist stark abhängig von der dortigen Nachfrage und den technisch und betrieblich fahrbaren Zugzahlen und -verteilungen. Zweigleisige Strecken mit LZB-Ausrüstung besitzen die höchste Leistungsfähigkeit und werden daher auch besonders intensiv genutzt. [Vgl. Geiß 2002, S. 60] Die Richtlinie 405 der DB gibt folgende Informationen vor, die im Betriebsprogramm enthalten sein sollen [DB Netz 405.0201 2008, Abschnitt 5 (3)]:

---

<sup>92</sup> Das einzige Projekt, welches momentan in Deutschland in dieser Richtung verfolgt wird, ist der Ausbau der bereits genannten Spessarttrampe, welcher deutlich geringere Steigungen und eine kürzere Fahrstrecke beinhaltet. [Vgl. Müller 2014, S. 67]



- Anzahl der Züge im Untersuchungszeitraum
- Struktur (Anteile und Reihenfolge von Zügen in den Zugarten und Gattungen)
- zeitliche Verteilung bzw. Fahrplan, Verkehrstage
- Zugeigenschaften
- Vorgaben zur Disposition (im Modell über Rangvorgaben abgebildet)

Es sind auch Anschluss- und Umlaufverknüpfungen zu berücksichtigen:

- Quell- und Zielortstrukturen der Züge
- Definition der Freiräume der Betriebsprogrammgestaltung

Da für diese Untersuchung die letzten beiden Punkte nicht relevant sind, finden sie im weiteren Verlauf keine Betrachtung mehr. Beide können weder mit den zur Verfügung stehenden Mitteln im Modell abgebildet werden, noch lassen sie sich mit den in dieser Arbeit verwendeten Lösungsansätzen beeinflussen.

Die Disposition hat zwar Einfluss auf den Energieverbrauch, eine Modellierung der Dispositionsentscheidungen würde aber für den gegebenen Rahmen zu komplex werden. Die Zugeigenschaften wurden bereits im Rahmen der Energieberechnung festgelegt und können in Kapitel 3.2.1 nachgeschlagen werden. Es bleiben also noch Anzahl, Struktur und Verteilung der Züge zu ermitteln.

Um den unterschiedlichen Arten von Engpässen Rechnung zu tragen, werden im Folgenden mehrere Betriebsprogramme entwickelt:

- B1: Zweigleisige Hauptstrecke (sehr hoch belastet)
- B2: Zweigleisige Hauptstrecke (hoch belastet)
- B3: Zweigleisige Hauptstrecke (durchschnittlich belastet)
- B4: Eingleisige Strecke (schwach belastet, nur SPNV)
- B5: Eingleisige Strecke (SPNV mit zusätzlichem Güterverkehr)

Die Auswahl der genannten Betriebsprogramme stützt sich vor allem auf die Ergebnisse der Engpassanalyse (siehe Kapitel 5). Für die Modellierung der stark belasteten und überlasteten Strecken und Knoten sind Betriebsprogramme notwendig, die die entsprechende Belastung hervorrufen. Eingleisige Strecken dagegen haben aufgrund der notwendigen Kreuzungsstellen eine deutlich ge-

ringere Leistungsfähigkeit und benötigen daher angepasste Betriebsprogramme. Als Basis dienen Betriebsprogramme bzw. Fahrplandaten existierender Strecken. Diese werden leicht modifiziert, um eine einfachere Handhabung für die Modellierung zu erreichen, ohne aber den Kern zu sehr zu verändern. Beispielsweise werden Einzelzüge oder einzelne Taktverstärker ignoriert. Auch die Verteilung der Zugkategorien über den Tag und die genauen Taktlagen werden nicht exakt berücksichtigt. Grundsätzlich wird von Zugpaaren ausgegangen, wodurch die Gesamtzugzahlen immer gerade sind. Dies ist zwar im Güterverkehr nicht immer der Fall, stellt aber im Rahmen der Modellerstellung eine zulässige Vereinfachung dar [Vgl. Drewello et al. 2013, S. 51].

Die Zuordnung der Betriebsprogramme zur jeweiligen Engpassstelle findet in den folgenden Kapiteln statt und orientiert sich vor allem an der Art des Engpasses und seiner Lage im Netz. Da jede Strecke ihr individuelles Betriebsprogramm besitzt, kann eine Modellierung nicht jedes Detail berücksichtigen. Im Rahmen einer Einzeluntersuchung der Engpassstellen kann in weiteren Forschungen das genaue Betriebsprogramm abgebildet werden. Im Bereich der La-Stellen ist die Abhängigkeit vom Betriebsprogramm am geringsten. Faktoren wie die Taktlagen der Züge spielen hier keine Rolle. Es ist zu erwarten, dass sich die Behebung einer La-Stelle bei einer hohen Zugzahl deutlicher auswirkt. Andererseits kann das Betriebsprogramm in dieser Kategorie am leichtesten angepasst werden, da jeweils der Ort der La-Stelle bekannt ist.

### **7.2.1 Zweigleisige Hauptstrecke (sehr hoch belastet)**

Der Abschnitt der Oberrheinstrecke zwischen Freiburg und Offenburg gehört als Teil des transeuropäischen Eisenbahnnetzes und Zulaufstrecke für die Basis-tunnel durch Gotthard und Lötschberg zu den meistbefahrenen Strecken in Deutschland. [Vgl. Holzhey 2010, S. 61] Die Ableitung eines Betriebsprogrammes aus den dort vorkommenden Zugzahlen ist also sinnvoll.

Die Angaben über Anzahl und Struktur der Züge wurden einer Untersuchung der FH Offenburg [Vgl. Drewello et al. 2013] und einer Studie der BVU AG im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung

[Vgl. Birn/Mann 2008] entnommen und im Bereich des Personenverkehrs mit der Reiseauskunft der DB verifiziert und ergänzt (siehe Tab. 23).<sup>93</sup>

**Tab. 23: B1 - Zugzahlen für sehr hoch belastete Strecken**

	SPFV	SPNV	SGV
Zugzahlen 5 – 23 Uhr (Taktzeiten [min])	72 (30)	144 (15)	72 (30)
Zugzahlen 23 – 5 Uhr (Taktzeiten [min])	6 (120)	12 (60)	72 (10)
<b>Zugzahlen gesamt pro Tag, beide Richtungen<sup>94</sup></b>	<b>78</b>	<b>156</b>	<b>144</b>

Quelle: Eigene Darstellung nach: Drewello et al. 2013, S. 51 und Birn/Mann 2008, S. 18 ff.

## 7.2.2 Zweigleisige Hauptstrecke (hoch belastet)

Die weiteren Betriebsprogramme für zweigleisige Strecken leiten sich aus dem ersten Betriebsprogramm ab, welches die höchste Belastung aufweist. Um eine einfache Handhabbarkeit des Modells zu gewährleisten, werden jeweils die Taktzeiten der Züge verlängert (siehe Tab. 24).

**Tab. 24: B2 - Zugzahlen für hoch belastete Strecken**

	SPFV	SPNV	SGV
Zugzahlen 5 – 23 Uhr (Taktzeiten [min])	36 (60)	108 (20)	36 (60)
Zugzahlen 23 – 5 Uhr (Taktzeiten [min])	6 (120)	12 (60)	48 (15)
<b>Zugzahlen gesamt pro Tag, beide Richtungen</b>	<b>42</b>	<b>120</b>	<b>84</b>

Quelle: Eigene Darstellung

<sup>93</sup> Abgerufen am 21.04.2015 für Mittwoch, 22.04.2015, SPFV Karlsruhe – Basel und SPNV Offenburg – Freiburg bzw. Denzlingen – Freiburg.

<sup>94</sup> Zugzahlen modifiziert nach Drewello et al. 2013 (Betriebstag Mittwoch), ergänzt um die Fahrten der Breisgau-S-Bahn von Freiburg nach Elzach. Zwischen Lahr und Denzlingen (Einmündung der Elztalbahn Richtung Freiburg) ändert sich die Belastung der Rheintalbahn nicht, sodass eine einfache Addition der Zugzahlen möglich war. Für sämtliche Züge steht nur der zweigleisige Abschnitt der Strecke Denzlingen – Gundelfingen zur Verfügung, bevor die Strecke sich wieder in Richtung Freiburg Hbf bzw. Freiburg Güterbahnhof verzweigt. Die Zahl der Fernzüge wurde leicht erhöht, um einen über den Tag einheitlichen Takt zu schaffen.

### 7.2.3 Zweigleisige Hauptstrecke (durchschnittlich belastet)

Das dritte Betriebsprogramm bildet eine zweigleisige Strecke mit deutlich geringerer Belastung ab (siehe Tab. 25). Die Einführung eines weiteren Betriebsprogrammes erscheint nicht sinnvoll, da die Wahrscheinlichkeit für Fahrstraßenkonflikte immer weiter absinkt und damit auch eine Verringerung der ungeplanten Halte einhergeht.

**Tab. 25: B3 - Zugzahlen für durchschnittlich belastete Strecken**

	SPFV	SPNV	SGV
Zugzahlen 5 – 23 Uhr (Taktzeiten [min])	18 (120)	72 (30)	18 (120)
Zugzahlen 23 – 5 Uhr (Taktzeiten [min])	0	0	24 (30)
<b>Zugzahlen gesamt pro Tag, beide Richtungen</b>	<b>18</b>	<b>72</b>	<b>42</b>

Quelle: Eigene Darstellung

### 7.2.4 Eingleisige Strecke (schwach belastet, nur SPNV)

Für die Betrachtung der eingleisigen Strecken sind die bisher erstellten Betriebsprogramme nicht geeignet. Die Mehrzahl dieser Strecken weist nur geringe Zugzahlen auf, in den meisten Fällen sind dies Nahverkehrszüge im 60-Minuten-Takt oder seltener im 30-Minuten-Takt. Fernverkehr (z.B. Lindau – München über Memmingen) ist ebenso wie Güterverkehr nur sehr selten vorhanden, daher werden diese Zuggattungen nicht berücksichtigt.

**Tab. 26: B4 - Zugzahlen für eingleisige Strecken (SPNV)**

	SPFV	SPNV	SGV
Zugzahlen 5 – 23 Uhr (Taktzeiten [min])	0	36 (60)	0
<b>Zugzahlen gesamt pro Tag, beide Richtungen<sup>95</sup></b>	<b>0</b>	<b>36</b>	<b>0</b>

Quelle: Eigene Darstellung

<sup>95</sup> Basierend auf der Reiseauskunft der DB abgerufen am 21.04.2015 für Mittwoch, 22.04.2015:  
Pirmasens – Landau (34 Züge) | Saalfeld – Niederpöhlitz – Gera (38 Züge) | Stralsund – Neubrandenburg (38 Züge) |  
Kassel-Wilhelmshöhe – Korbach (38 Züge) | München Ost – Mühldorf (52 Züge) | Ulm – Memmingen (70 Züge)

Da auf der Mehrzahl der eingleisigen Strecken nur ein Zugpaar pro Stunde verkehrt, wird dies auch als Maßgabe für das Betriebsprogramm der eingleisigen Strecken verwendet. Die resultierenden Zugzahlen sind in Tab. 26 aufgelistet.

### 7.2.5 Eingleisige Strecke (SPNV mit zusätzlichem Güterverkehr)

Besonders im Hafen-Hinterlandverkehr ist der Druck groß, Verkehre von den hochbelasteten Strecken auf bisher wenig genutzte Strecken zu verlegen. Dazu gehören auch mehrere eingleisige Strecken. Diese haben zwar nicht die gleiche Leistungsfähigkeit wie eine zweigleisige Strecke, können aber bei entsprechend kleinen Kreuzungsabständen leistungsfähig genug für eine substantielle Zahl an Güterzügen sein. [Vgl. Eickmann et al. 2008, S. 31] Beispiele hierfür sind die Amerikalinie (Bremen – Uelzen – Stendal), die Strecke Lübeck – Büchen – Lüneburg oder Uelzen – Gifhorn – Braunschweig. Für eine leistungsfähige Verbindung sind auf diesen Strecken noch Ausbaumaßnahmen wie Elektrifizierung oder Oberbaumaßnahmen notwendig, die teilweise bereits im BVWP verankert sind. [Vgl. Eickmann et al. 2008, S. 47] Für diese Strecken wurde das Betriebsprogramm 4 angepasst und zusätzlich zum Regionalverkehr noch mit der doppelten Anzahl an Güterzügen belastet (siehe Tab. 27).

**Tab. 27: B5 - Zugzahlen für eingleisige Strecken (SPNV + SGV)**

	SPFV	SPNV	SGV
Zugzahlen 5 – 23 Uhr (Taktzeiten [min])	0	36 (60)	36 (60)
Zugzahlen 23 – 5 Uhr (Taktzeiten [min])	0	0	36 (60)
<b>Zugzahlen gesamt pro Tag, beide Richtungen</b>	<b>0</b>	<b>36</b>	<b>72</b>

Quelle: Eigene Darstellung

### 7.2.6 Zuordnung der Betriebsprogramme zu den Engpassstellen

Für die weitere Berechnung erfolgt die Zuordnung der Betriebsprogramme, welche in den folgenden Kapiteln entwickelt werden, zu den jeweiligen Engpassstellen. Das erste Kriterium stellt die Anzahl der Gleise des Engpasses dar, wozu das zugeordnete Betriebsprogramm passen muss. Als zweites stellt sich

die Frage nach der Höhe der Zugzahlen, die sich für eine realistische Berechnung der Energieverbräuche möglichst nah an den tatsächlichen Zugzahlen halten sollte. Im Falle der Personenzüge wurde die Reiseauskunft der DB zu Hilfe genommen, bei Güterzügen sind – abgesehen von der Zugzählung, die die Basis für B1 bildet – exakte Zahlen kaum zu bekommen. In einigen Fällen kann davon ausgegangen werden, dass die Überlastung der Kante durch einen hohen Güterverkehrsanteil entsteht wie beispielsweise auf der Strecke entlang der rechten Rheinseite zwischen Bonn und Neuwied. Hierfür wird im Hinblick auf die Handhabbarkeit des Modells kein eigenes Betriebsprogramm entwickelt, zumal in diesen Fällen der Fernverkehrsanteil gering bis nicht vorhanden ist und sich die Problematik der inhomogenen Höchstgeschwindigkeiten und der damit verbundenen Überholungen nicht stellt.

Da die Strecken, welche die Basis der Betrachtung bilden, allesamt als Engpass identifiziert wurden, dominieren bei der Zuordnung zu den Kantenengpässen die Betriebsprogramme mit den hohen Zugzahlen. Im Bereich der La-Stellen kommen hauptsächlich die eingleisigen Betriebsprogramme mit geringen Zugzahlen zur Anwendung, da sie sich zu großen Teilen auf Nebenbahnen befinden. Im Fall des zweigleisigen Beispielknotens werden alle Betriebsprogramme für zweigleisige Strecken untersucht. Den eingleisigen Strecken wurde das Betriebsprogramm B5 zugeordnet, auch wenn dort möglicherweise kein Güterverkehr stattfindet. Die Information, ob eine Strecke überhaupt von Güterzügen befahren wird, war für diese Arbeit nicht zu ermitteln.

### 7.3 Modellierung der zweigleisigen Kanten

Wie oben beschreiben können Kanten von sehr unterschiedlicher Gestalt sein. Viele verschiedene Faktoren wie die Anzahl der Gleise, die zulässige Höchstgeschwindigkeit, die Blocklängen oder die Abstände der Überleitstellen<sup>96</sup> und

---

<sup>96</sup> Überleitstellen sind „Blockstelle[n] der freien Strecke, an der Züge auf ein anderes Streckengleis derselben Strecke übergehen können.“ [Pachl 2013a, S. 266]

Überholbahnhöfe<sup>97</sup> spielen eine Rolle. Durch die Vielzahl der Einflüsse ist es schwierig, allgemeingültige Aussagen über das Leistungsverhalten von Kanten zu treffen.

### 7.3.1 Grundlagen des Kantenmodells

Letztlich beschäftigt sich diese Arbeit im Bereich der Kantenengpässe nur mit der Problematik der geplanten Halte von Güterzügen, welche schneller fahrenden Personenzügen ausweichen müssen. Zu ermitteln ist also eine Größe, mit deren Hilfe eine Aussage über die Häufigkeit dieser Überholungen getroffen werden kann. Die Literatur gibt hierüber keine verwertbaren Auskünfte,<sup>98</sup> weswegen zunächst ein anderer Ansatz gewählt wird. Aufbauend auf dem Fahrplan einer Beispielstrecke soll errechnet werden, wie häufig Güterzüge bei unterschiedlichen Streckenbelastungen von Überholungen durch schnellere Züge betroffen sind. Da jedoch für diese Arbeit keine Software zur Fahrplanerstellung zur Verfügung steht, die in einer angemessenen Zeit valide Ergebnisse hätte erbringen können, wird auch dieser Ansatz verworfen.<sup>99</sup>

Es bleibt nur die Wahl eines festen Wertes, um überhaupt eine Rechengrundlage zu erhalten.<sup>100</sup> Im weiteren Verlauf wird davon ausgegangen, dass ein Güterzug auf einer Mischverkehrsstrecke im Durchschnitt alle 70 km überholt werden muss. Es kann angenommen werden, dass auf Strecken mit niedrigeren Zugzahlen die Anzahl der geplanten Überholungen abnimmt bzw. bei höherer Belastung ansteigt und der feste Wert angepasst werden müsste. Da aber keine

---

<sup>97</sup> Überholbahnhöfe sind Bahnhöfe, die keine verkehrliche Funktion haben, sondern nur dazu dienen, einen langsamen Zug durch einen schnelleren überholen zu lassen.

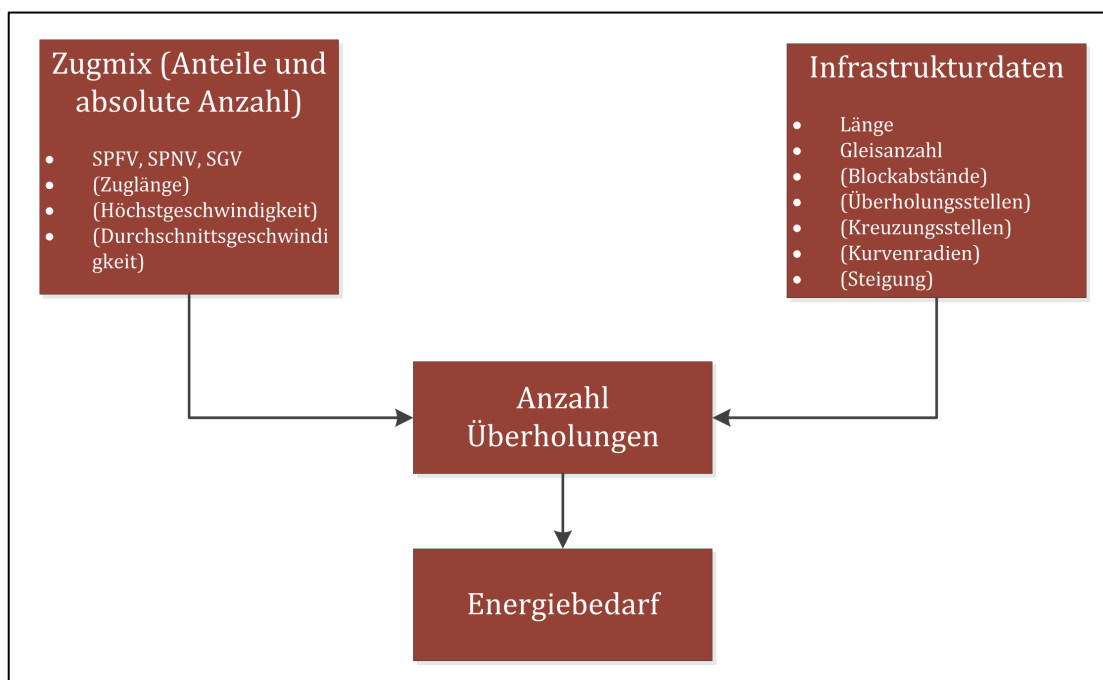
<sup>98</sup> Dies lässt den Schluss zu, dass es sich hierbei um ein bisher wenig untersuchtes Feld handelt. Vermutlich lassen die einzelnen Güterverkehrsunternehmen solche Faktoren mit in ihre Kalkulationen einfließen. Auch die DB Netz ist natürlich im Besitz dieser Daten. Allerdings gibt es nach Auskunft von Herrn Rittner (DB Netz, Bereich Analytik Betrieb) keine systematische Aufbereitung und Auswertung der Rohdaten. Es besteht also durchaus Forschungsbedarf auf diesem Gebiet.

<sup>99</sup> Prinzipiell ist eine Fahrplanerstellung mit der in dieser Arbeit verwendeten Simulationssoftware OpenTrack möglich. Da die Fahrplanerstellung aber nicht der Hauptzweck des Programms ist, sondern OpenTrack normalerweise einen fertigen Fahrplan als Input erwartet, ist die Einrichtung eines Fahrplanes für einen Kantenengpass durchschnittlicher Länge sehr zeitaufwändig. Im Hinblick auf die Tatsache, dass dieser Abschnitt nur einen kleinen Teil der gesamten Arbeit ausmacht, wurde eine solche Simulation nicht realisiert.

<sup>100</sup> Dieser Wert wurde nach längeren Gesprächen mit den Betreuern der Arbeit festgelegt. Basis dafür sind Recherchen von Herrn Rittner und Herrn Schumann (DLR), der im Rahmen des Projektes Eco Rail eine Simulation der Strecke Hannover – Hamburg ausgewertet hat. Eine bessere Näherung war im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich.

Datengrundlage für eine solche Anpassung vorliegt, wird der feste Wert unabhängig vom verwendeten Betriebsprogramm beibehalten. Ebenso finden streckenseitige Werte, wie die zulässige Höchstgeschwindigkeit oder das eingebaute Zugsicherungssystem, aus diesem Grund keinen Eingang in das Modell. Auch eine Berücksichtigung von Verspätungen ist nicht möglich. In einer genaueren Untersuchung jedes einzelnen Engpasses kann diese Zahl angepasst werden, sofern dann genauere Daten vorliegen. Die grundsätzliche Funktionsweise des Modells ist davon unabhängig.

**Abb. 16: Modellschema Kantenengpässe**



Quelle: Eigene Darstellung

Mit einem festen Wert für die Abstände zwischen den einzelnen Überholvorgängen sind die meisten in Abb. 16 genannten Eingangsparameter nicht mehr notwendig und daher in Klammern gesetzt. Für eine detaillierte Untersuchung eines konkreten Falles müssten diese Parameter allerdings vorliegen. Die Erstellung einer Infrastruktur und eines Fahrplanes entfällt damit für dieses vereinfachte Verfahren. Aus den Betriebsprogrammen, welche in Kapitel 7.2 entwickelt wurden, werden lediglich die Zahlen der Güterzüge verwendet. Zur Berechnung der Fahrdynamik und der Energieverbräuche werden die Eckdaten der Züge aus Kapitel 3.2.1 herangezogen. In die Berechnung fließen nur die Gü-



terzüge zwischen 5 und 23 Uhr ein. Die übrigen Güterzüge verkehren nachts und stehen nur noch in Konkurrenz zu sehr wenigen Fernverkehrszügen. Die Anzahl der Überholungen ist daher sehr gering.

### 7.3.2 Verfahrensweise

Auf der Basis des im vorigen Kapitel hergeleiteten Wertes kann eine Aussage über die Anzahl der Güterzüge getroffen werden, welche von schnelleren Personenzügen überholt werden. Es wird davon ausgegangen, dass jeder Güterzug, der auf diesem Engpass verkehrt, alle 70 km einmal überholt wird. Ist der Engpass kürzer oder länger, wird diese Zahl entsprechend angepasst.<sup>101</sup> Fliegende Überholungen,<sup>102</sup> wie sie vor allem in Tagesrandstunden vorkommen, werden nicht berücksichtigt. Auf diese Weise ergibt sich für alle zuvor ermittelten Engpässe eine Anzahl von überholten Güterzügen pro Tag, die dann im Hinblick auf den Energieverbrauch weiter ausgewertet werden kann. Im Gegensatz zum Modell der Knoten, welches im folgenden Kapitel erläutert wird, geht man bei den Kantenengpässen davon aus, dass nur Bremsvorgänge bis zum Halt des Zuges vorkommen und der Zug nicht vorzeitig wieder beschleunigen darf. Die Auswertung wird mithilfe einer Tabellenkalkulation erstellt, die in leicht abgewandelter Form auch für die übrigen Engpasskategorien zum Einsatz kommt.

Die Haltezeit des Zuges, die im Hinblick auf Fahrzeitverluste durch Überholungen eine Rolle spielt, kann nicht ermittelt werden. Eine Bewertung von Ausbaumaßnahmen im Hinblick auf Fahrzeitverkürzungen ist damit nicht möglich. Da Güterzüge im Stand nur wenig Energie verbrauchen, ist diese Tatsache für die Energieberechnung nicht von Bedeutung.

---

<sup>101</sup> Auf einem Kantenengpass von 140 km Länge wird ein Güterzug also zwei Mal überholt, auf einem Engpass von 35 km Länge 0,5 Mal (also nur jeder zweite Güterzug).

<sup>102</sup> Fliegende Überholung bezeichnet eine Überholung zweier fahrender Züge, die in dieselbe Richtung fahren. [Vgl. Pacht 2013a, S. 15]

## 7.4 Modellierung der Knoten

An erster Stelle steht die Festlegung, welche Arten von Knoten überhaupt betrachtet werden sollen. Die Probleme bei der Untersuchung komplexer Knoten wurden bereits in Kapitel 5.2.2 thematisiert. Viele Verknüpfungen von Strecken finden in Bahnhöfen statt, die damit die Funktionen Bahnhof und Abzweigstelle in einer Betriebsstelle<sup>103</sup> vereinen. Daneben gibt es Abzweigstellen auch ohne verkehrliche Funktion, wenn Strecken nicht im Bahnhofsbereich verbunden sind. Dort halten bei störungsfreiem Betrieb keine Züge. Bei dichter Zugfolge ist jedoch in allen Fällen eine gewisse Wahrscheinlichkeit gegeben, dass mit dem Auftreten von Zugverspätungen Fahrstraßenkonflikte entstehen, die ihrerseits zu nicht geplanten Halten und damit zu höherem Energieverbrauch führen. Hinzu kommt, dass Abzweigstellen eine eher einfach gestaltete Topologie besitzen und daher leichter zu modellieren sind. Daher wird beispielhaft der Abzweig zweier zweigleisiger Strecken untersucht. Diese Art des Knotens ist bei höhengleichem Abzweig<sup>104</sup> und hohen Belastungen durch die bestehenden Fahrstraßenausschlüsse besonders konfliktanfällig [Vgl. Pachl 2013a, S. 149].

Eine Knotenuntersuchung der Niederlassung Süd der DB Netz aus dem Jahr 2005 zeigt die Verteilung der Knoten nach der Anzahl der Zugfahrten pro Tag. Die weitaus größte Zahl der Knoten weist zwischen 50 und 350 Zugfahrten auf, welche durch die entworfenen Betriebsprogramme hinreichend genau widergespiegelt werden. [Vgl. Bendfeldt 2005, S. 21]

### 7.4.1 Grundlagen des Knotenmodells

Für die in Kapitel 7.4 beschriebene Untersuchung müssen nun Eingangsparameter festgelegt werden, die im Vorfeld für jeden zu untersuchenden Knoten ermittelt werden müssen. Abb. 17 veranschaulicht die notwendigen Eingangsdaten und das daraus entwickelte Modell zur Erfassung von Belegungskonflikten.

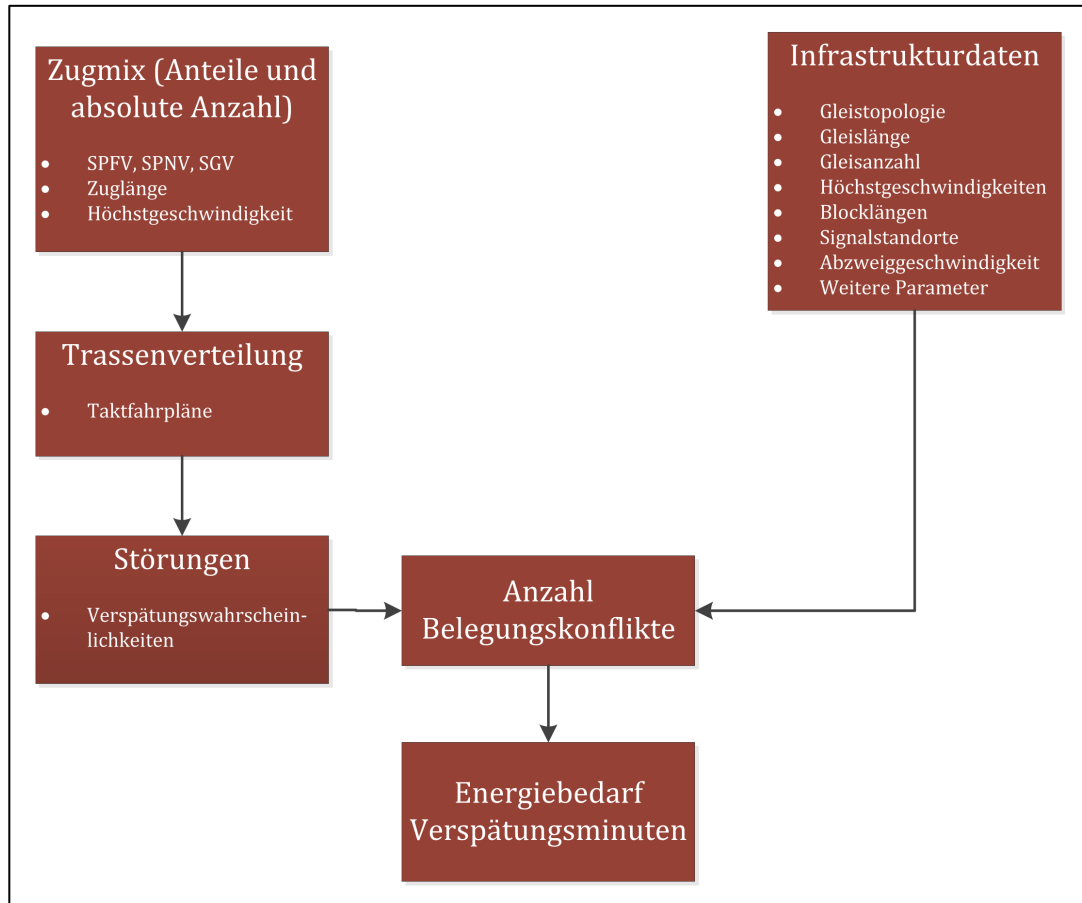
---

<sup>103</sup> Betriebsstellen sind „Stellen in Bahnhöfen und auf der freien Strecke, die der unmittelbaren Regelung und Sicherung der Zug- und Rangierfahrten dienen.“ [Pachl 2013a, S. 255]

<sup>104</sup> Im Falle eines höhengleichen Abzweigs ist die Kreuzung der beiden Gleise meist durch eine Kreuzungsweiche realisiert. Im Gegensatz dazu steht der höhenfreie Abzweig, bei dem die kreuzenden Gleise durch ein Überwerfungsbauwerk (z.B. Brücke) oder Unterwerfungsbauwerk (z.B. Tunnel) getrennt sind.

Aus diesen Belegungskonflikten resultieren ungeplante Halte oder zumindest Bremsvorgänge und damit ein erhöhter Energieverbrauch.

**Abb. 17: Modellschema Knotenengpässe**



Quelle: Eigene Darstellung

Die Definition der Züge und Betriebsprogramme wurde bereits in den Kapiteln 3.2.1 und 7.2 dargestellt, sodass an betrieblichen Daten noch ein Fahrplan und die Verspätungshöhen und -wahrscheinlichkeiten festzulegen sind.

Im Bereich der Infrastruktur müssen neben grundsätzlichen Werten wie Gleistopologie, Gleislängen und Abzweiggeschwindigkeiten von Weichen weitere Parameter festgelegt werden. Je nach Grad der Detaillierung sind dies Signalsysteme, Signalsichtweiten und Vorsignalabstände.

### 7.4.2 Modellierung mit OpenTrack

Grundsätzlich ist eine analytische Untersuchung für eine Knotenanalyse gut geeignet, da sie im Vergleich zur Simulation deutlich geringere Anforderungen an die Genauigkeit der Eingangsdaten hat. Es existiert ein von Pachl entwickeltes Verfahren, mit dem die Anzahl der gegenseitigen Behinderungen von Zügen in Knoten auf der Basis von Sperrzeiten und Wahrscheinlichkeiten bestimmt werden kann [Vgl. Pachl 2013a, S. 151-153]. Gerade für kleinere Knoten kann es ohne großen Aufwand einen ersten Überblick über die betrieblichen Möglichkeiten des Knotens geben. Da dieses Verfahren jedoch keine Verspätungen berücksichtigt und diese für die vorliegende Arbeit von besonderem Interesse sind, wird stattdessen das Mittel der Simulation gewählt. Eine Simulation kann für einen begrenzten Untersuchungsraum wie z.B. die zu betrachtende Abzweigstelle aussagekräftige Ergebnisse liefern. Sie ist mit deutlich größeren Vorbereitungsarbeiten verbunden und nur mit einigem Aufwand an veränderte Situationen anzupassen. Trotz dieses Nachteils wird ein Beispielknoten mithilfe der Eisenbahn-Simulationssoftware OpenTrack dargestellt.

OpenTrack bildet Eisenbahninfrastruktur abstrahiert in Knoten und Kanten ab. Die Begriffe Knoten und Kanten stehen dabei abweichend von der in Kapitel 5.1.2 getroffenen Definition für sehr kleinräumige Einteilungen, wodurch eine sehr feingliedrige Gestaltung der Infrastruktur ermöglicht wird. Ein Knotenelement wie eine Weiche besteht in OpenTrack aus mindestens zwei Kanten und drei Knoten.

### 7.4.3 Infrastruktur der Abzweigstelle

Gewählt wurde eine typische zweigleisige Abzweigstelle, wie sie an vielen Stellen im deutschen Eisenbahnnetz vorkommt [Vgl. Bendfeldt 2005, S. 20].<sup>105</sup> Wie in Kap. 7.4.1 gezeigt, benötigt die Modellierung der Infrastruktur diverse Inputparameter, die in Tab. 28 verzeichnet sind.

---

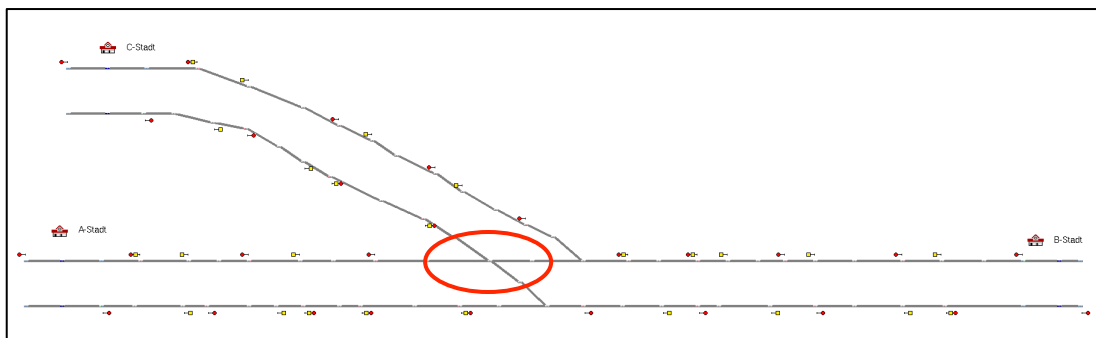
<sup>105</sup> Die Untersuchung von Bendfeldt zeigt, dass die häufigste Knotenart die Verknüpfung einer zweigleisigen mit einer eingleisigen Strecke ist. Da an diesen Stellen aber die Belastungen der abzweigenden Strecke meist deutlich geringer sind, wurde diese Art des Knotens nicht für die weitere Analyse ausgewählt.

**Tab. 28: Parameter Infrastruktur Knoten**

Parameter	Einheit	Abzweigstelle
Höchstgeschwindigkeit	[km/h]	160
Abzweiggeschwindigkeit	[km/h]	100
Gleisanzahl		2
Blocklängen	[m]	1.000 – 2.000
Signalsystem		H/V
Signalsichtweite	[m]	500
Vorsignalabstände	[m]	1.000

Quelle: Eigene Darstellung

Diese Parameter bilden die Grundlage für die Infrastrukturerstellung in OpenTrack wie sie in Abb. 18 dargestellt ist. Die Markierung zeigt den kritischen Fahrstraßenausschluss in der höhengleichen Kreuzung.

**Abb. 18: Infrastruktur Knoten**


Quelle: Eigene Darstellung

#### 7.4.4 Fahrplan

Die Simulation mit OpenTrack erfordert die Eingabe eines Zugfahrplans. Fahrpläne orientieren sich am Laufweg der Züge, den Verkehrshalten und den zulässigen Geschwindigkeiten [Vgl. Pachl 2013a, S. 169]. Zusätzlich müssen verschiedene Zwangspunkte wie Überholungen, Anschlussbeziehungen oder Zugkreuzungen auf eingleisigen Strecken beachtet werden [Vgl. Pachl 2013a, S. 179-185]. Durch die Begrenzung des Untersuchungsraumes ergeben sich größere Auswirkungen auf die Fahrplangestaltung. Einziger Zwangspunkt der untersuchten Abzweigstelle ist die Kreuzung im Abzweig, weitere Zwangspunk-

te, wie z.B. einzuhaltende Anschlussbeziehungen, werden nicht betrachtet, da sie außerhalb des Untersuchungsraumes liegen. Dadurch ist es leicht möglich, einen Fahrplan zu konstruieren, der nur wenig anfällig gegenüber Verspätungen ist. Ein solcher Fahrplan dient als Basis für das weitere Vorgehen. Um die fehlenden Zwangspunkte mit einzubeziehen, wird die Verteilung der Züge über eine Stunde nachträglich verändert, sodass die Pufferzeiten zwischen den Zügen deutlich geringer werden.<sup>106</sup> Dies dient lediglich dazu, eine Gleichverteilung der Züge zu verhindern, die außerhalb von theoretischen Betrachtungen bei Mischverkehr kaum vorkommt.

Eine genaue Aussage über das Behinderungspotential in einem Knoten kann nur in einer Einzeluntersuchung für den jeweiligen Knoten festgestellt werden. Im weiteren Verlauf dieser Untersuchung wird daher ein exemplarischer Fahrplan für die entwickelten Betriebsprogramme unter bestimmten Annahmen festgelegt. Diese dienen der Funktionsfähigkeit des hier vorgestellten Modells, können aber im operativen Betrieb deutlich abweichen. Die erste dieser Annahmen wurde bereits mit der Festlegung der Betriebsprogramme getroffen, viele weitere im Bereich der Infrastrukturgestaltung. Folgende Annahmen gelten für die Fahrplangestaltung:

- Eine Hälfte der Züge befährt den Abzweig im geraden Strang, die andere im abzweigenden Strang.
- Der Fahrplan für den Personenverkehr ist symmetrisch mit der Symmetrieminute<sup>107</sup> 58 aufgebaut. Für den Güterverkehr werden nachfolgend Trassen dazwischen konstruiert.
- Die Züge des SPFV und des SGV fahren mit der jeweiligen Höchstgeschwindigkeit in den Untersuchungsraum ein und halten nicht an den Bahnhöfen an. Die Züge des SPNV halten an allen Bahnhöfen. Da die Grenzen des Untersuchungsraumes Bahnhöfe sind, steht für den SPNV am Anfang immer ein Beschleunigungsvorgang und am Ende ein Bremsvorgang.

---

<sup>106</sup> Da die Gesamtzahl der Züge nicht verändert wurde, hat sich dadurch auch die Summe der Pufferzeiten nicht verändert. Lediglich die Verteilung über eine Stunde wurde verändert.

<sup>107</sup> Ein Zug begegnet dem Gegenzug seiner Linie immer zur Symmetrieminute. Im Stundentakt gibt es pro Linie zwei Symmetrieminuten, bei kürzeren Takten gibt es entsprechend mehr. [Vgl. Hansen/Pachl 2014, S. 44]

- OpenTrack arbeitet mit einer Bremskurve, die ständig vor dem Zug hergeschoben wird. Trifft diese Kurve auf ein haltzeigendes Signal, so bremst der Zug bis zum Stillstand. Sollte das Signal in der Zwischenzeit auf Fahrt gehen, wird der Zug sofort wieder beschleunigen. Eine etwaige Bremskurvenüberwachung durch die punktförmige Zugbeeinflussung wird hierbei nicht berücksichtigt. [Vgl. Pahl 2013a, S. 73]

#### 7.4.5 Verspätungswahrscheinlichkeiten

Für die Modellierung der Verspätungen wird auf die Richtlinie 405 der DB zurückgegriffen (siehe DB Netz 405 2008). Da kein Zug im Untersuchungsbereich beginnt, kommen die Werte für Einbruchsverspätungen zur Anwendung. Diese sind in Tab. 29 aufgeführt. OpenTrack benötigt für die Verteilungsfunktion der Verspätungen auch einen Maximalwert, der auf das Sechsfache des Mittelwertes festgelegt wird [Vgl. DB Netz 2014b, S. 10]. Wie bei Fahrplan und Infrastruktur gilt auch bei den Verspätungen: Diese sind rein theoretischer Natur und können im konkreten Fall deutlich abweichen und damit ein stark verändertes Ergebnis erzeugen. Valide Verspätungsdaten aus dem realen Betrieb sind nur schwer zu bekommen, daher werden die Werte aus der Richtlinie 405 verwendet.

**Tab. 29: Näherungswerte für Einbruchsverspätungen**

Zugart	Wahrscheinlichkeit	Mittelwert [min]
SPFV	0,5	5,0
SPNV	0,6	4,5
SGV	0,6	10,0

Quelle: Eigene Darstellung nach: DB Netz 405.0204A03 2008, Tabelle 2

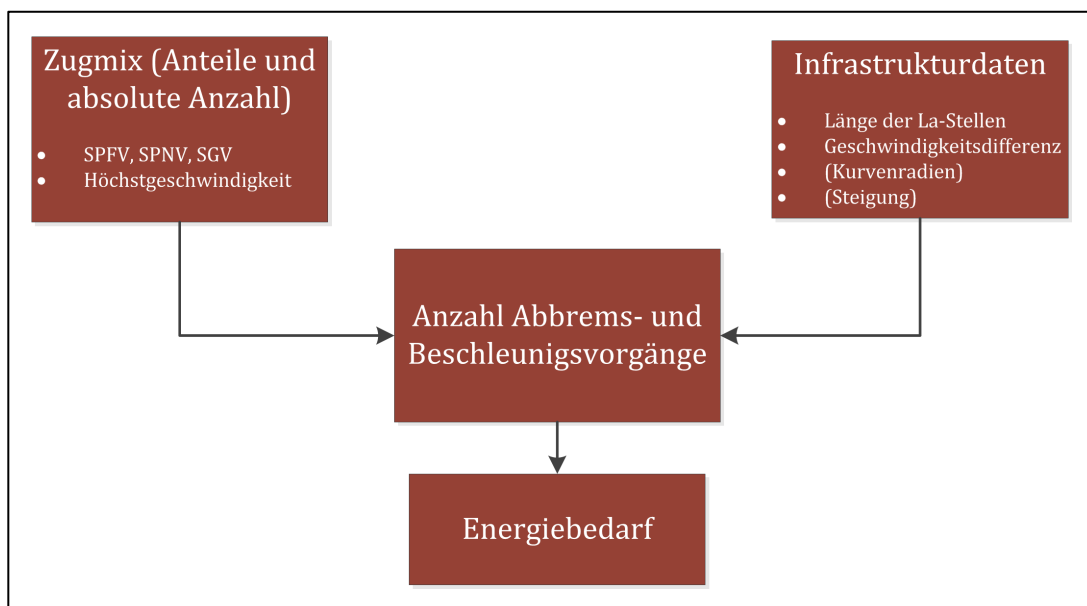
Für die Verteilung der Verspätungen erstellt OpenTrack feste Szenarien, die sich unter gleichen Simulationsbedingungen auch immer gleich verhalten. Diese Funktion wird genutzt, um die Auswirkungen eines Infrastrukturausbaus unter ansonsten gleichbleibenden Randbedingungen zu simulieren, indem die Züge jeweils einmal über die höhengleiche und einmal über die höhenfreie Kreuzung fahren. Die Differenz an Halten und Abbremsvorgängen wird mithilfe einer Ta-

bellenkalkulation aus den Protokolldaten von OpenTrack ermittelt. Um eine ausreichende Streuung der Verspätungen zu gewährleisten, wird mit zehn unterschiedlichen Verspätungsszenarien simuliert und aus diesen der Durchschnitt gebildet.

## 7.5 Modellierung der La-Stellen

Die Modellierung der La-Stellen gestaltet sich recht unkompliziert. Da jeder Zug, der auf der entsprechenden Strecke verkehrt, die La-Stelle passieren muss, können ohne weitere Prüfung alle Züge in die Berechnung einbezogen werden. Im Gegensatz zu den übrigen Engpasskategorien spielt der Zeitpunkt der Überfahrt keine Rolle, sodass die Erstellung eines Fahrplanes entfällt. Lediglich die Zugzahlen aus den Betriebsprogrammen fließen gemeinsam mit den Höchstgeschwindigkeiten der Fahrzeuge in die Berechnung ein. Auf der Infrastrukturseite sind die wichtigen Eigenschaften der La-Stelle, nämlich ihre Länge und die Höhe der reduzierten Geschwindigkeit, zu berücksichtigen. Die Berechnung erfolgt dann per Tabellenkalkulation. Das zugehörige Modellschema ist in Abb. 19 dargestellt.

**Abb. 19: Modellschema La-Stellen**



Quelle: Eigene Darstellung



## 7.6 Modellierung der eingleisigen Strecken

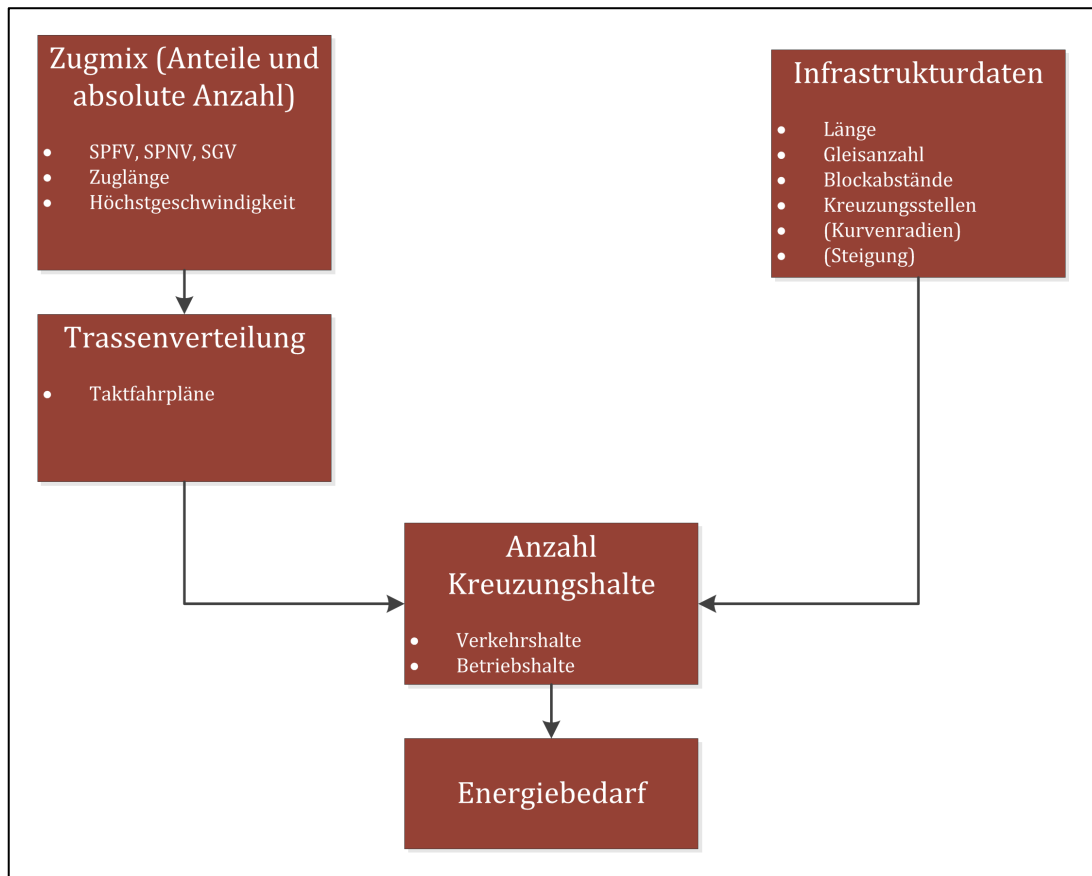
Die Engpasskategorie der eingleisigen Strecken hat ihre Problematik in den notwendigen Kreuzungshalten der Züge. Dies lässt im Vergleich zu zweigleisigen Strecken nur deutlich geringere Zugzahlen zu. Durch die weitgehende Vertaktung des Nahverkehrs entfällt oft die Möglichkeit, mehrere Züge gebündelt in eine Richtung fahren zu lassen, was die Kapazität weiter einschränkt [Vgl. Pahl 2013, S. 166].

### 7.6.1 Grundlagen des Modells für eingleisige Strecken

Wie bereits beschrieben, fallen die Kreuzungshalte des Regionalverkehrs häufig mit Verkehrshalten an Bahnhöfen oder Haltepunkten zusammen. Eine Beseitigung dieser Halte durch infrastrukturelle Maßnahmen ist also nicht möglich. Die Arbeit konzentriert sich im Weiteren auf die Kreuzungshalte von Güterzügen, welche rein betrieblicher Natur sind, sofern der betreffende Bahnhof nicht das Ziel des Güterzuges darstellt.

Der dahinter stehende Gedanke liegt in der Vermeidung der Güterzughalte durch Begegnungsabschnitte, welche eine Kreuzung zweier Züge ohne Halt ermöglichen (siehe Kapitel 7.6.5), ohne die Strecke zweigleisig auszubauen. Gerade im Hinblick auf den Versuch, die hochbelasteten Hauptachsen zumindest um einige Güterzugtrassen zu entlasten, kommt Güterzügen auf eingleisigen Strecken eine erhöhte Bedeutung zu. Selbst ein Güterzug pro Stunde und Richtung ergibt immerhin 24 Güterzugtrassen pro Richtung, die anderswo nicht mehr benötigt werden.

Das Modell (dargestellt in Abb. 20) basiert auf den Betriebsprogrammen für die eingleisigen Strecken, wobei wegen der Relevanz des Güterverkehrs nur B5 zum Einsatz kommt. Weiterhin sind die Eingangsparameter in den Bereichen Fahrplan und Infrastruktur zu entwerfen, was unter Berücksichtigung der bisher für die Fahrzeuge angenommenen Werte erfolgt.

**Abb. 20: Modellschema eingleisige Strecken**


Quelle: Eigene Darstellung

### 7.6.2 Modellierung mit OpenTrack

Die Simulation dient für die eingleisige Strecke hauptsächlich als Testumgebung bezüglich der Realisierbarkeit der zu entwickelnden Fahrpläne bzw. der Validität des Modells.<sup>108</sup> Es werden zwei parallele Infrastrukturen erstellt. Eine nur mit „herkömmlichen“ Kreuzungsbahnhöfen und eine zweite mit dem Ausbau der Bahnhöfe zu Begegnungsstellen. Aus dem Vergleich der beiden Varianten bei gleichen Zugzahlen soll bestimmt werden, wie viele Halte durch einen solchen Infrastrukturausbau vermieden werden können.

<sup>108</sup> Prinzipiell besteht für die Untersuchung der eingleisigen Strecken dasselbe Problem wie bei den Kantenengpässen. OpenTrack ist für eine generische Fahrplanerstellung nur bedingt geeignet. Optimal wäre die Nutzung eines Fahrplan-konstruktionsprogrammes wie FBS gewesen, dieses stand aber im Rahmen dieser Arbeit nicht zur Verfügung. Da die Betriebsprogramme B4 und B5 für eingleisige Strecken nur maximal 2 Zugpaare pro Stunde enthalten, war eine Simulation mit OpenTrack mit vertretbarem Aufwand möglich.

### 7.6.3 Infrastruktur der eingleisigen Strecke

Für die Modellstrecke wird ein durchschnittlicher Abstand dieser Kreuzungsstellen von 10,5 km angenommen, was dem Durchschnitt aller in Kapitel 5.2.4 ermittelten eingleisigen Engpässe entspricht. Die Kreuzungsbahnhöfe sind für das Modell gleichverteilt. Die Abstände zwischen den Ausfahrtsignalen der Bahnhöfe und den Einfahrweichen sind so lang, dass keine Fahrstraßenauschlüsse vorliegen und somit eine gleichzeitige Einfahrt aus beiden Richtungen möglich ist. Zwischen den einzelnen Bahnhöfen liegt trotz des großen Abstandes nur ein Blockabschnitt mit entsprechender Länge. Dies erschwert die Folge von Zügen, die hintereinander in dieselbe Richtung fahren. Da dies aber selten praktiziert wird und zudem eine komplizierte Blocklogik zwischen den Bahnhöfen mit sich bringt [Vgl. Pachl 2013a, S. 59], wird diese Annahme als sinnvoll erachtet.

**Tab. 30: Eingangsdaten Infrastruktur der eingleisigen Strecke**

Parameter	Einheit	Abzweigstelle
Höchstgeschwindigkeit	[km/h]	120
Gleisanzahl		1
Stationsabstände	[km]	10,5
Stationsanzahl		8
Signalsystem		H/V
Signalsichtweite	[m]	500
Vorsignalabstände	[m]	1.000

Quelle: Eigene Darstellung

Bei der Wahl des Signalsystems, der Signalsichtweite und der Vorsignalabstände orientiert sich die eingleisige Strecke an der Simulation des Knotens (siehe Tab. 28 und Tab. 30).

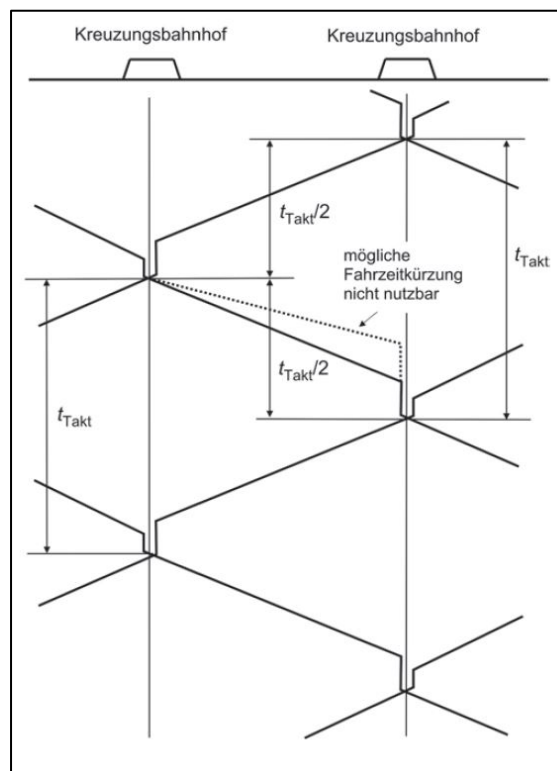
### 7.6.4 Fahrplan

Es wird entsprechend dem Betriebsprogramm B4 ein Stundentakt im Regionalverkehr angenommen, zwischen dem jeweils ein Güterzugpaar verkehrt. Auf-

grund der großen und immer identischen Bahnhofsabstände ist ein weiteres Zugpaar im Güterverkehr nicht zu realisieren. Die Regionalzüge halten an jedem Bahnhof, die Güterzüge fahren mit voller Geschwindigkeit in den Untersuchungsabschnitt ein und auch wieder aus ihm heraus.

Die besondere Schwierigkeit des Fahrplans eingleisiger Strecken besteht in den vielen Kreuzungsbeziehungen, die sich über die gesamte Fahrstrecke des Zuges ergeben. Auf der zweigleisigen Strecke ist die Veränderung einer Abfahrts- oder Ankunftszeit in gewissem Rahmen leicht möglich, bei der eingleisigen Strecke verändern sich sofort sämtliche Kreuzungen des betreffenden Zuges. In vielen Fällen bleiben dann Trassen oder Fahrzeitgewinne ungenutzt, da sie nur auf Teilstücken verwendbar und nicht für den kompletten Laufweg des Zuges nutzbar sind, wie in Abb. 21 leicht ersichtlich ist. [Vgl. Pachl 2013a, S. 198]

**Abb. 21: Fahrplanrestriktionen eingleisige Strecke**



Quelle: Pachl 2013a, S. 198

Weiterhin spielt die Wahl der Pufferzeiten auf eingleisigen Strecken eine große Rolle, da sich im Falle zu geringer Pufferzeiten bei verspäteten Zugkreuzungen die Verspätung sofort auch in die Gegenrichtung fortpflanzt und die Stabilität

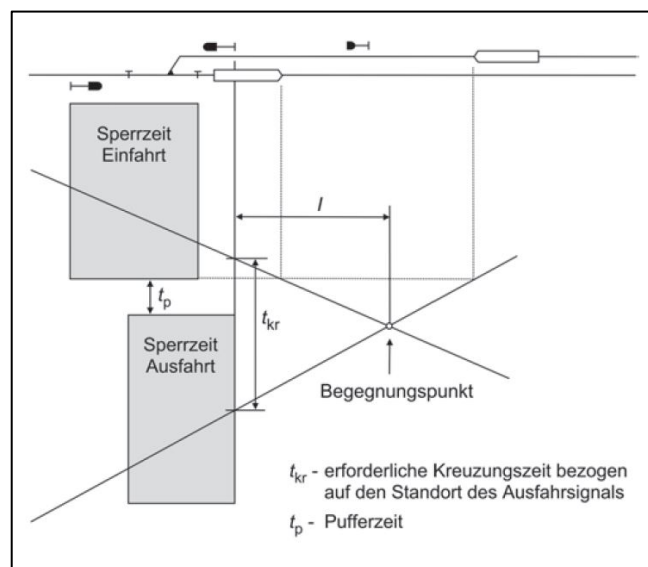
des Fahrplans beeinträchtigt. Im vorliegenden Fall wurde eine Haltezeit bzw. Pufferzeit von je einer Minute gewählt. [Vgl. Pachl 2013a, S. 209]

Die Güterzüge werden bei der Fahrplanerstellung möglichst so gelegt, dass sie einen Verkehrshalt der Personenzüge zum Kreuzen nutzen können und bei den Güterzugkreuzungen nur einer der beiden Züge anhalten muss. Analog zum Fahrplan des Knotenmodells besteht auch hier das Problem, dass außerhalb des Untersuchungsraumes liegende Randbedingungen nicht mit einbezogen werden konnten. Eine derartige Bevorzugung der Güterzüge ist natürlich nicht immer möglich, wird aber für die Erstellung des theoretischen Modells akzeptiert. Für die ausgebaute Infrastruktur mit Begegnungsstellen muss der Fahrplan leicht angepasst werden, da die bisherigen Kreuzungshalte der Güterzüge nicht mehr erforderlich sind.

### 7.6.5 Länge des Kreuzungsabschnittes

Der Bau von Kreuzungsabschnitten mit ausreichender Länge kann eine fliegende Kreuzung ermöglichen. Analog zur fliegenden Überholung besteht ihr Vorteil darin, dass die kreuzenden Züge mit Streckengeschwindigkeit auf dem zweigleisigen Abschnitt aneinander vorbeifahren können und ein Halt für die Zugkreuzung nicht notwendig ist.

**Abb. 22: Zugfolge bei fliegender Überholung**



Quelle: Pachl 2013a, S. 201

Für diesen Ansatz bietet Pachl ein einfaches Berechnungsverfahren, welches ausgehend von den Zuggeschwindigkeiten die nötige Länge eines solchen Abschnittes unter Einbeziehung von ausreichenden Pufferzeiten liefert. [Vgl. Pachl 2013a, S. 200-203] Der gesamte Vorgang ist in Abb. 22 dargestellt.

Entscheidend sind die Sperrzeiten für Ein- bzw. Ausfahrt der entgegenkommenden Züge. Diese dürfen sich in der Sperrzeitentreppe nicht überlappen, so dass als erstes derjenige Zeitpunkt gesucht werden muss, an dem sich die beiden Sperrzeiten genau berühren. Sollen noch Pufferzeiten (in Abb. 22 mit  $t_p$  bezeichnet) hinzugefügt werden, müssen diese in die Berechnung mit einbezogen werden. Als Bezugspunkt wählt Pachl den Standort des Ausfahrtsignals, um dann die Entfernung desselben vom Begegnungspunkt der Züge zu berechnen, unter dem alle bisher genannten Randbedingungen eingehalten sind. Folgende Formeln werden verwendet:

$$t_{kr} = \frac{s}{v_{1,k}} + \frac{s}{v_{2,k}} \quad [s] \quad (7.1)$$

mit  $t_{kr}$  = Kreuzungszeit für fliegende Kreuzung  
 $v_{1,k}$  = Geschwindigkeit des ersten Zuges  
 $v_{2,k}$  = Geschwindigkeit des zweiten Zuges  
 $s$  = Entfernung vom Standort des Ausfahrtsignals bis zum Begegnungspunkt beider Züge

bzw. umgeformt:

$$s = \frac{t_{kr}}{\frac{1}{v_{1,k}} + \frac{1}{v_{2,k}}} \quad [m] \quad (7.2)$$

Diese Werte müssen für beide Bahnhofsköpfe berechnet werden, wobei zuerst mit Formel (7.1) die Kreuzungszeit berechnet wird. Der Wert  $s$  für den ausfahrenden Zug bemisst sich aus der Fahrstraßenbildezeit und der Signalsichtzeit und dem Vorsignalabstand<sup>109</sup>. Dazu kommt die Pufferzeit und für den einfahrenden Zug sein Abstand  $s$  von Zugspitze zum Ausfahrtsignal<sup>110</sup> im Moment der

<sup>109</sup> Pachl nimmt diese als geschwindigkeitsunabhängig an, setzt also gleich einen festen Zeitwert ein.

<sup>110</sup> Da beide Bahnhofsköpfe getrennt voneinander berechnet werden, sind jeweils Aus- und Einfahrtsignal eines Bahnhofskopfes gemeint.

Fahrstraßenauflösung der Einfahrstraße. Sollte die Zugspitze in diesem Moment das Ausfahrtsignal noch nicht erreicht haben, ist dieser Wert negativ.

Im zweiten Schritt wird mit der gerade ermittelten Kreuzungszeit der Abstand des Ausfahrtsignals zum Begegnungspunkt der beiden Züge errechnet. Wenn dies für beide Bahnhofsköpfe geschehen ist, werden beide Werte addiert und es ergibt sich die Länge der Kreuzungsstelle bezogen auf die Standorte der Ausfahrtsignale. Im verwendeten Modell geht es nur um die Kreuzungen der Güterzüge, daher kommen die Werte für Güterzüge aus Kapitel 3.2.1 zum Einsatz

**Tab. 31: Eingangswerte Berechnung Kreuzungsabschnittslänge**

Eingangswerte	Einheit	Wert
Geschwindigkeit der kreuzenden Züge	[km/h]	100
Geschwindigkeit im abzweigenden Strang der Weiche	[km/h]	100
Pufferzeit	[s]	60
Signalsichtzeit	[s]	10
Fahrstraßenbildezeit	[s]	2
Vorsignalabstände	[m]	1.000
Zuglänge	[m]	550
Abstand Fahrstraßenzugschlussstelle der Einfahrstraße zum Ausfahrtsignal der Gegenrichtung	[m]	150

Quelle: Eigene Darstellung nach: Pachl 2013a, S. 202

Da die Infrastruktur der Bahnhofsköpfe sowie die Geschwindigkeiten und Zuglängen der entgegengerichteten Züge identisch sind, genügt die Berechnung für eine Seite des Bahnhofs und es ergibt sich für die Kreuzungszeit:

$$t_{kr} = 12s + \frac{1.000 \text{ m}}{27,77 \frac{\text{m}}{\text{s}}} + 60s + \frac{550\text{m} - 150\text{m}}{27,77 \frac{\text{m}}{\text{s}}} \approx 123s \quad [s] \quad (7.3)$$

Hieraus kann dann der Abstand zwischen Ausfahrtsignal und Begegnungspunkt errechnet werden:

$$s = \frac{123s}{\frac{1}{27,77 \frac{m}{s}} + \frac{1}{27,77 \frac{m}{s}}} \approx 1.704m \quad [m] \quad (7.4)$$

Die Länge der Begegnungsstellen muss also mindestens 3.408 m betragen. Dieser Wert wurde in die OpenTrack-Simulation eingepflegt und ist Grundlage für die Bestimmung der Güterzughalte nach dem Infrastrukturausbau.



## **8 Auswertung Energiebedarfe und Infrastrukturausbau**

In diesem Kapitel werden alle bisherigen Vorbereitungs- und Modellierungsarbeiten zusammengeführt. Für alle Engpasskategorien werden die Energieverbräuche berechnet und den Infrastrukturkosten gegenübergestellt, die für eine Beseitigung des Engpasses entstehen würden. Daneben werden weitere Indikatoren betrachtet, die durch einen Infrastrukturausbau beeinflusst werden. Abschließend wird eine kritische Betrachtung der Ergebnisse erfolgen.

### **8.1 Einführende Erläuterungen**

Die Modifikationen am Berechnungsmodell für den Energiebedarf, siehe auch Kapitel 3.1.4, werden im Folgenden kurz erklärt. Anschließend wird ein allgemeiner Energiepreis ermittelt, der zur monetären Bewertung der Energiebedarfe herangezogen wird.

#### **8.1.1 Erläuterung der angepassten Berechnungsmethodik zur Ermittlung des Energiemehrbedarfs am Beispiel der La-Stellen**

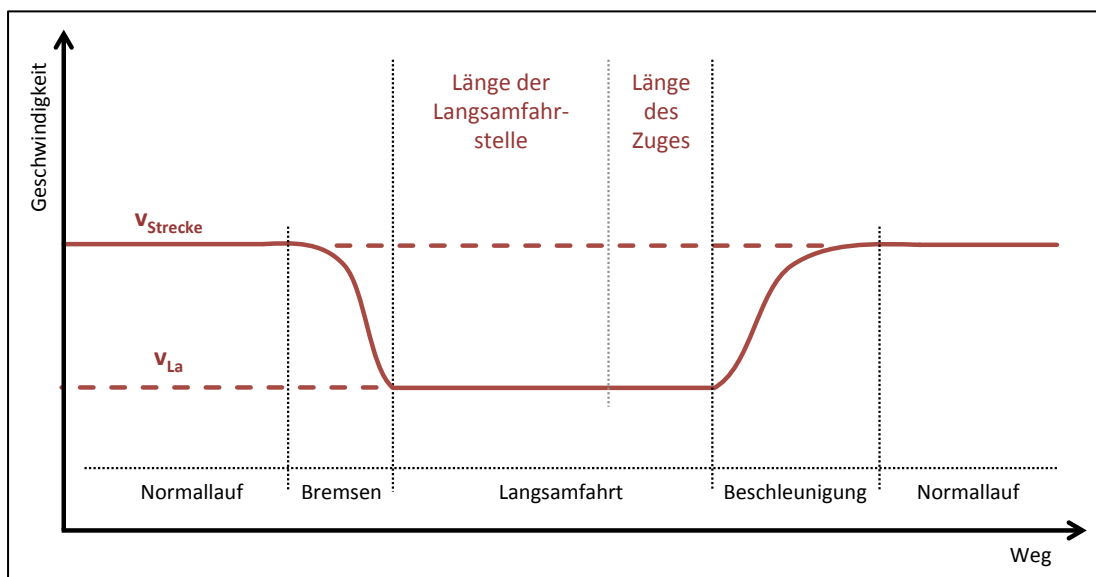
Die in diesem Kapitel dargestellte Berechnungsmethodik wird beispielhaft für die Engpasskategorie La-Stelle beschrieben. Dies gilt für die Begrifflichkeiten im Fließtext und für die Notation der Formeln. Die Berechnungsmethodik an sich wird aber ebenfalls für die anderen Engpasskategorien übernommen.

Aus der energetischen Herleitung in Kapitel 3 ist bekannt, dass jedes Beschleunigen zu einem deutlich höheren Energiebedarf führt. Der in diesem Kapitel benötigte Energiemehrbedarf  $E_{La}$  lässt sich aus vier Werten berechnen:

1. Die Größe des Energiemehrbedarfs durch die Beschleunigung nach dem Passieren der La-Stelle  $E_{b(La)}$ .
2. Die Energieeinsparung für die Beharrungsfahrt mit reduzierter Geschwindigkeit in der La-Stelle  $E_{f(La)}$ .
3. Die Energieeinsparung während des Bremsvorgangs vor der La-Stelle  $E_{Brems(La)}$ .
4. Die Menge an rückgespeicherter Energie aufgrund des Bremsvorgangs vor der La-Stelle  $E_{Rück(La)}$ .

Die vier genannten Werte finden sich auch im logischen Modell eines Zuglaufes beim Passieren einer La-Stelle (siehe Abb. 23).

**Abb. 23: Modell eines Zuglaufes beim Passieren einer La-Stelle**



Quelle: Veränderte Darstellung nach: Horvát 2014, S. 14

Die Gleichung (8.1) zeigt auf, wie der Gesamtmehrverbrauch berechnet wird. Dies wird für alle Zugkategorien durchgeführt und der Energiemehrbedarf ab Stromabnehmer jeder Zugkategorie zu einem absoluten Energiemehrbedarf addiert.

$$E_{La} = \sum_{i=1}^k (E_{b(La)_i} - E_{f(La)_i} - E_{Brems(La)_i} - E_{Rück(La)_i}) \quad [Wh] \quad (8.1)$$

- mit  $E_{La}$  = Energiemehrbedarf einer La-Stelle [Wh]  
 $E_{b(La)}$  = Energiemehrbedarf durch Beschleunigung nach Passieren der La-Stelle [Wh]  
 $E_{f(La)}$  = Energieminderbedarf durch verringerte Beharrungsgeschwindigkeit in der La-Stelle [Wh]  
 $E_{Brems(La)}$  = Energieminderbedarf während des Bremsvorgangs vor der La-Stelle [Wh]  
 $E_{Rück(La)_i}$  = Energiegewinn durch Rückspeisung während des Bremsvorgangs vor der La-Stelle [Wh]

Zur Berechnung von  $E_{La}$  wurde eine umfangreiche Tabelle mit der Bezeichnung „La-Stellen\_Energiemehrbedarfsrechnung“ erstellt, welche sich als Anhang 11 im digitalen Anhang befindet. In diese Tabelle sind alle Informationen bzgl. der Zugkategorie, des verwendeten Fahrzeugs sowie der spezifischen La-Stelle eingetragen. Das Ergebnis ist der jeweilige Energiemehrbedarf der einzelnen La-Stelle, sowie der Gesamtenergiemehrbedarf aller aufgelisteten La-Stellen. Der dafür verwendete Berechnungsalgorithmus basiert auf der energetischen Herleitung in Kapitel 3.1.4 und wurde den Anforderungen entsprechend leicht modifiziert.

Als Berechnungsgrundlage wird das in Kapitel 7.2 beschriebene Betriebsprogramm verwendet. Dabei wird jede Strecke, welche eine La-Stelle aufweist, mit Hilfe des Eisenbahnatlas analysiert und geprüft, welche Arten von Verkehren dort stattfinden und das entsprechende Betriebsprogramm darüber gelegt.

#### 8.1.1.1 Berechnung des Energiemehrbedarfs aufgrund der Beschleunigung

Bei der Berechnung des spezifischen Energiebedarfs ab Stromabnehmer wird die Gleichung (3.38) herangezogen und den Umständen der Betrachtung angepasst. So wird der spezifische Energiebedarf für die Beharrung  $e_f$  nicht berücksichtigt, da einzig die Beschleunigung von Interesse ist.

$$e_{b(La)} = \frac{e_b}{\eta_{Fzg}} + e_n + e_h \quad \left[ \frac{Wh}{tkm} \right] \quad (8.2)$$

- mit  $e_{b(La)}$  = spezifischer Energiebedarf Beschleunigung einer La-Stelle [Wh/tkm]  
 $e_b$  = spezifischer Energiebedarf Beschleunigung [Wh/tkm]  
 $\eta_{Fzg}$  = Wirkungsgrad Fahrmotor [%]  
 $e_n$  = spezifischer Energiebedarf Nebenverbraucher [Wh/tkm]  
 $e_h$  = spezifischer Energiebedarf Heizung/Klimatisierung [Wh/tkm]

Die Werte für den spezifischen Energiebedarf bei einer Beschleunigung  $e_b$  können nach der Gleichung (3.35) berechnet werden. Die Länge  $l_a$  setzt sich zusammen aus der originären Länge der La-Stelle sowie der jeweiligen Zuglänge. Der spezifische Energiebedarf für die Nebenverbraucher  $e_n$  ermittelt sich nach der Gleichung (3.37). Der Wert für den spezifischen Energieverbrauch für Heizung und Klimatisierung  $e_h$  wurde pauschal mit  $4 \text{ Wh/tkm}$  angenommen.<sup>111</sup> Die Wirkungsgrade werden wie bisher mit  $\eta_{Fzg} = 0,8$  angegeben. Der Wert für den Massenfaktor  $\xi$  ist aus der Tab. 3 abzulesen. Werden nun alle benannten Gleichungen in die Gleichung (3.38) eingesetzt, entsteht folgender Ausdruck:

$$e_{b(La)} = \frac{0,0107 \cdot \frac{\xi}{l_a} \cdot (v_S^2 - v_{La}^2)}{\eta_{Fzg}} + 0,000642 \cdot \frac{\xi}{l_a} \cdot (v_S^2 - v_{La}^2) + e_h \quad \left[ \frac{\text{Wh}}{\text{tkm}} \right] \quad (8.3)$$

mit  $\xi$  = Zuschlagsfaktor für rotierende Massen [1]

$l_a$  = Beschleunigungsweg [m]

$v_S$  = Streckengeschwindigkeit [m/s]

$v_{La}$  = Geschwindigkeit in der La-Stelle [m/s]

Ist der spezifische Energiebedarf berechnet worden, kann mittels der Multiplikation mit der Transportarbeit<sup>112</sup> der absolute Energiebedarf für die Beschleunigung ermittelt werden. Die Streckenbelastung  $T_T$  ergibt sich aus der Gleichung (3.21) und muss nicht gesondert angepasst werden. Für die Berechnung der Transportarbeit wird allerdings die Gleichung (3.22) modifiziert. Statt der Abschnittslänge  $L$  wird der Beschleunigungsweg  $l_a$  verwendet. Dieser hängt vom Schienenfahrzeug und seiner Beschleunigung sowie von der Anfangsgeschwindigkeit ab, siehe Gleichung (3.49) und (3.51). Wird die Gleichung (3.51) in die Gleichung (3.49) eingesetzt und in die Einheit Kilometer umgerechnet, ergibt dies die Gleichung (8.4).

$$l_a = \frac{\frac{a}{2} \cdot \left( \frac{v_S - v_{La}}{a} \right)^2 + v_{La} \cdot \left( \frac{v_S - v_{La}}{a} \right)}{1.000} \quad [\text{km}] \quad (8.4)$$

mit  $a$  = Beschleunigung [ $\text{m/s}^2$ ]

<sup>111</sup> Zur Erinnerung:  $e_h$  kommt nur bei Personenzügen zum Einsatz. Für Züge der Kategorie SGV entfällt dieser Wert. (siehe auch Kapitel 3.1.4.4)

<sup>112</sup> Wie in Kapitel 3.1.3 beschrieben, wird die Transportarbeit  $A_{TT}$  aus der Multiplikation von der Streckenbelastung  $T_T$  und der Abschnittslänge  $L$  ermittelt.

Nun können auf Basis der Gleichung (3.41) alle Werte eingesetzt und der absolute Energiemehrbedarf berechnet werden, siehe Gleichung (8.5).

$$E_{b(La)} = e_{b(La)} \cdot A_{TT} \quad [km] \quad (8.5)$$

mit  $A_{TT}$  = Transportarbeit während der Zeit T [tkm]

### 8.1.1.2 Energieeinsparung durch reduzierte Geschwindigkeit

Der zweite Berechnungsschritt liegt in der Ermittlung des reduzierten Energiebedarfs aufgrund der verringerten Geschwindigkeit des Schienenfahrzeugs beim Durchfahren der La-Stelle. Grundlage dafür ist die Ermittlung des spezifischen Energiebedarfs für eine Beharrungsfahrt, siehe auch Gleichung (3.27). Es muss sowohl der spezifische Energiebedarf für die verringerte Geschwindigkeit als auch für die maximale Geschwindigkeit<sup>113</sup> berechnet werden, siehe Gleichung (8.6). Wie bereits in Kapitel 7 beschrieben, werden bei der Berechnung des Energiebedarfs die spezifischen Widerstände für die Bögen und Neigungen der Strecken nicht berücksichtigt. Einzig der spezifische Fahrzeugwiderstand  $w_f$  unterscheidet sich und muss jeweils separat berechnet werden.

Die Gleichung (8.6) stellt den Rechenweg für die Ermittlung von  $E_{f(La)}$  dar. Zu beachten ist, dass hier bei der Berechnung der Transportarbeit statt der Abschnittslänge  $L$  oder des Beschleunigungsweges  $l_a$  die Länge der La-Stelle  $L_{La}$  verwendet wird. Ansonsten ist die Rechnung analog zur Gleichung (8.5).

$$E_{f(La)} = (e_f - e_{f(La)}) \cdot T_Z \cdot L_{La} \quad [Wh] \quad (8.6)$$

mit  $e_f$  = spez. Energiebedarf für eine Beharrungsfahrt bei  $v_s$  [Wh/tkm]

$e_{f(La)}$  = spez. Energiebedarf für eine Beharrungsfahrt bei  $v_{La}$  [Wh/tkm]

$T_Z$  = Streckenbelastung je Zugkategorie [t]

$L_{La}$  = Länge einer La-Stelle [m]

### 8.1.1.3 Energieeinsparung während des Bremsvorgangs

Als dritte Komponente wird die Energieeinsparung während des Bremsvorgangs  $E_{Brems(La)}$  betrachtet. Im Vergleich zu einem durchfahrenden Zug verbraucht ein bremsendes Fahrzeug nur wenig Energie. Um die Rechnung zu ver-

<sup>113</sup> Die maximale Geschwindigkeit kann entweder über die maximale Betriebsgeschwindigkeit des Schienenfahrzeugs definiert oder durch die maximal fahrbare Streckengeschwindigkeit vorgegeben werden.

einfachen, wird in dieser Arbeit davon ausgegangen, dass das Fahrzeug während des Bremsvorganges gar keine Energie benötigt. Dabei wird das Thema der Energierückgewinnung in dieser Arbeit nochmals separat betrachtet und fließt in diesen Berechnungsabschnitt nicht mit ein (siehe Kapitel 8.1.1.4).

Die Berechnung von  $E_{Brems(La)}$  basiert auf der Ermittlung des Bremsweges je Zugkategorie. Dazu wird die Gleichung (3.54) verwendet. Der Bremsweg dient der Ermittlung der Transportarbeit auf dieser Länge und des daraus entstehenden absoluten Energiebedarfs für eine Beharrung.

$$E_{Brems(La)} = e_f \cdot T_Z \cdot l_b \quad [Wh] \quad (8.7)$$

mit  $l_b$  = Bremsweg je Zugkategorie [km]

So kann verglichen werden, wie hoch der Energiebedarf für eine Beharrung beim Verbleiben auf der Streckengeschwindigkeit wäre. Dieser Betrag wird durch das Bremsen vor der La-Stelle eingespart.

#### 8.1.1.4 Energierückgewinnung

Viele EVU stellen keine Informationen zu ihren Rückspeisungsquoten zur Verfügung [Vgl. Leister 2011, S. 145]. Für die Berechnung der Energierückgewinnung werden daher die pauschalen Angaben der DB aus ihrem Nachhaltigkeitsbericht 2012 verwendet, auch wenn nicht nachvollziehbar ist, wie die DB die angegebenen Werte ermittelt hat.

Wie bereits in Kapitel 7.1 erläutert, fließen in die Betrachtung viele Strecken ohne elektrische Traktion mit ein. Auf diesen Strecken findet keine Energierückgewinnung statt. Damit ist der Wert auf diesen Strecken gleich Null und fließt bei der Berechnung des Energiemehrbedarfs nicht mit ein.

#### 8.1.2 Energiepreisberechnung

Zur Berechnung der monetären Belastungen infolge des Energiemehrbedarfs der Engpassstellen muss ein durchschnittlicher Energiebezugspreis ermittelt werden. Laut DB Netz setzt sich der Energiepreis aus folgenden Komponenten zusammen [Vgl. DB Netz 2015a]:

- Energielieferpreis nach zeitlicher Differenzierung
- Netzentgelt gemäß individueller Nutzungsstruktur
- Rückspeisevergütung
- Gesetzliche Umlagen
- Stromsteuer und Zuschlag Erneuerbare-Energien-Gesetz

In dieser Arbeit werden zur Ermittlung eines durchschnittlichen Bahnstrompreises die Dokumente „Bahnstrompreisregelung“ und „Preisblatt für die Nutzung des 16,7 Hz Bahnstromnetzes“ verwendet [Vgl. DB Energie 2015b; Vgl. DB Energie 2015c]. Sind zwei verschiedene Werte angegeben, wird daraus ein Mittelwert gebildet. So beträgt beispielsweise der Arbeitspreis Energie im Hochtarif 6,46 ct/kWh und im Niedertarif 5,32 ct/kWh. Daraus wurde der durchschnittliche Arbeitspreis Energie von 5,89 ct/kWh gebildet. Bei der Berechnung der Netzentgelte für die Entnahme wurde ein Mittelwert aus den Arbeitspreisen für die Bezugsdauer von > 2.500 h/a sowie < 2.500 h/a gebildet. Dieser Mittelwert wurde zu den Entgelten für die Messung und die Abrechnung addiert. Das Ergebnis ist zusammen mit den anderen Werten in Tab. 32 aufgelistet.

**Tab. 32: Energiepreise**

Energie-lieferpreis [ct/kWh]	Netzentgelte für Entnahme [ct/kWh]	Rückspeise- vergütung [ct/kWh]	gesetzliche Umlagen [ct/kWh]	Steuern und Zuschläge [ct/kWh]
5,89	3,95	8,42	0,33	2,38
<b>Summe: 12,56 ct/kWh</b>				

Quelle: Eigene Darstellung nach: DB Energie 2015b, S.1 f.; DB Energie 2015c, S. 1 ff.

Für die Ermittlung der durchschnittlichen Rückspeisevergütung wurde das gleiche Verfahren angewendet. Zusätzlich müssen die gesetzlichen Umlagen beachtet werden [Vgl. DB Energie 2015c, S. 2]. In der Spalte Steuern und Zuschläge setzt sich der angegebene Wert aus der Umlage auf Basis des Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) in Höhe von 1,234 ct/kWh<sup>114</sup> und der Stromsteuer mit

<sup>114</sup> Der angegebene Wert bezieht sich auf die besondere Ausgleichsregelung im EEG für Schienenbahnen. So müssen ab Mitte des Jahres 2014 die EVU 20 % der EEG-Umlage auf ihre Energiebedarfe zahlen. Bei einer EEG-Pauschale von aktuell 6,17 ct/kWh müssen die EVU folglich 1,234 ct/kWh zahlen. [Vgl. EEG § 65; Vgl. Netztransparenz 2015]

1,142 ct/kWh zusammen [Vgl. Netztransparenz 2015; Vgl. EEG §65; Vgl. StromStG 2012, §9 (2)].

Aus der Tab. 32 lässt sich ein durchschnittlicher Energiebezugspreis von 10,18 ct/kWh ermitteln. Werden noch die steuerlichen Aufschläge hinzuaddiert, ergibt sich ein Bezugspreis von 12,56 ct/kWh, mit dem in dieser Arbeit gerechnet wird. Für die Energierückspeisung erhält ein Unternehmen 8,42 ct/kWh. Eine jährliche Teuerungsrate beim Bahnstrom wird in dieser Arbeit nicht berücksichtigt.<sup>115</sup> Mit diesen Werten können nun abschließend die Energiemehrkosten aller aufgeführten Engpassstellen ermittelt werden.

### 8.1.3 Infrastrukturkosten

Im Hinblick auf die Berechnung der Infrastrukturkosten, welche im weiteren Verlauf dieses Kapitels zum Tragen kommen, sind mehrere Vorbemerkungen zur Verwendung des Infrastrukturkataloges aus Kapitel 6.3 nötig. Diese gelten nicht für die Infrastrukturkostenbetrachtung der La-Stellen in Kapitel 8.4.

Die Abschreibungskosten werden bei der DB Netz linear ermittelt und ergeben sich aus dem Quotienten aus Investitionskosten und der bilanziellen Nutzungszeit [Vgl. Lienau/Siefer 2007, S. 600]. Die DB Netz verwendet für ihre Abschreibungsberechnung den Wert der „betriebsgewöhnlichen Nutzungsdauer“, welcher teilweise deutlich unter der recherchierten technischen Lebensdauer liegt [Vgl. DB Netz 2015, S. 31]. Da Teile der Eisenbahninfrastruktur eine sehr hohe Lebensdauer erreichen können, wird für die Berechnung der Investitions- und Abschreibungskosten in diesem Kapitel ein Mittelweg gewählt. Es wird ein Betrachtungszeitraum von 25 Jahren festgelegt, welcher der geringsten technischen Lebensdauer eines einzelnen Infrastrukturelementes entspricht<sup>116</sup>. Wenn die technische Lebensdauer größer ist, werden die Infrastrukturkosten und die

---

<sup>115</sup> Theoretisch ergab die Preisentwicklung des Bahnstroms aus den Jahren 2007 bis 2013 eine durchschnittliche jährliche Steigerung von rund 4,85 % [Vgl. Mofair/Netzwerk 2014, S. 58]. Da aber die zukünftige Preisentwicklung gerade über einen sehr langen Zeitraum von mehreren Jahrzehnten nicht ausreichend genau vorhersehbar ist, wird auf die Betrachtung einer daher rein spekulativen Preisentwicklung verzichtet.

<sup>116</sup> Das Infrastrukturelement Aufzug mit der kürzesten technischen Lebensdauer wird in betreffenden Berechnungen nicht einzeln verwendet.



kalkulatorischen Zinsen nur anteilig entsprechend ihrer gesamten technischen Lebensdauer in Anschlag gebracht.

Um die Zusammenstellung der Infrastrukturkosten zu erleichtern wurde auf Basis der in Kapitel 6 zusammengestellten Kostensätze eine Tabelle erstellt (siehe Anhang 12), die eine übersichtliche Erfassung der Infrastrukturelemente erlaubt. Nötig ist nur eine Eingabe von Länge oder Anzahl der Elemente, dann werden automatisch sämtliche Bau- und Instandhaltungskosten der gesamten Strecke errechnet. Bei zweigleisigen Elementen werden die Kosten entsprechend verdoppelt. Diese Kosten stellen nur eine Annäherung an die tatsächlich anfallenden Kosten dar, da die genauen Längen und die Anzahl von Infrastrukturelementen ohne detaillierte Trassierung nicht präzise festgestellt werden können. Die angelegte Tabelle erlaubt es aber, in kurzer Zeit einen Überblick über die nötige Infrastruktur und ihre Folgekosten zu bekommen.

## **8.2 Engpasskategorie: Hochbelastete Kanten**

Der erste Analyseteil beschäftigt sich mit den Energieverbräuchen der Kantenengpässe. Gemäß der in Kapitel 7.3 entwickelten Modellierung wird für die Güterzüge die Zahl der planmäßigen Überholungen ermittelt und in Energieverbräuche umgerechnet. Diese werden dann mit den Kosten möglicher Ausbaumaßnahmen verglichen.

### **8.2.1 Ergebnisberechnung Energieverbrauch**

In die Auswertung der Kantenengpässe wurden nur Engpässe von über 20 km Länge aufgenommen. Überholungen von Güterzügen auf sehr kurzen Engpassabschnitten erschienen weniger relevant. Grundsätzlich kommen Überholungen natürlich auf allen Strecken mit Mischverkehr und inhomogenen Geschwindigkeiten vor. Die ausgewählten Engpässe sind lediglich die am stärksten betroffenen Streckenabschnitte. Tab. 33 zeigt die Gesamtauswertung der Kantenengpässe sowohl im Hinblick auf die Anzahl der Überholungen als auch auf Energieverbrauch und -kosten.

**Tab. 33: Auswertung Kanten Energie + Kosten**

lfd. Nr.	Streckenr.	Streckenabschnitt	Länge [km]	Betriebsprogramm	Überholungen pro Tag	Überholungen p.a.	Energieverbrauch p.a. [kWh]	Kosten p.a. [EUR]
8	1700	Wunstorf - Minden	44,1	1	45	16.556	3.404.705	435.542
10	2270	Grenze D/NL - Oberhausen	72,6	1	75	27.256	5.605.137	717.030
12	3600	Hanau - Gelnhausen	44,3	1	46	16.631	3.420.128	437.515
13	3600	Gelnhausen - Fulda	66,7	1	69	25.041	5.149.627	658.759
16	3601	Darmstadt - Mannheim-Friedrichsfeld	50,8	1	52	19.072	3.922.115	501.731
17	4010	Frankfurt-Sportfeld - Mannheim	74	1	76	27.782	5.713.307	730.867
18	5503	Mering - Olching	27,1	1	28	10.174	2.092.260	267.649
19	4000	Offenburg - Freiburg - Basel	93	1	96	34.915	7.180.193	918.517
20	5903 / 5050 / 6362	Nürnberg - Marktredwitz - Reichenbach	239	3	61	22.432	4.613.091	590.123
22	5600	München Ost - Markt Schwaben	18,2	2	12	4.555	936.725	119.829
24	5302	Neu-Ulm - Neuoffingen	28	1	29	10.512	2.161.769	276.541
29	4020	Graben-Neudorf - Karlsruhe	21	1	22	7.884	1.621.327	207.406
33	2550	Hagen - Köln-Mülheim	68	1	70	25.529	5.249.983	671.597
35	2630	Köln-West - Bad Godesberg	38	2	26	9.511	1.955.916	250.208
36	2324	Bonn-Beuel Neuwied	45,5	3	12	4.271	878.321	112.358
37	3900	Gießen - Friedberg	33,5	2	23	8.385	1.724.357	220.586
38	3510	Gau-Algesheim - Mainz	20,2	2	14	5.056	1.039.755	133.009
39	4020	Karlsruhe - Hockenheim	40,2	1	41	15.092	3.103.636	397.028
40	5510 / 5702	München - Rosenheim - Kieferselden	97	2	67	24.278	4.992.717	638.687
43	5910	Fürth - Würzburg	94,6	2	65	23.677	4.869.123	622.876
44	5200	Würzburg - Gemünden	37,8	2	26	9.461	1.945.634	248.892
45	1720	Lüneburg - Uelzen	35	1	36	13.140	2.702.212	345.677
<b>Summe</b>			<b>1.289</b>		<b>990</b>	<b>361.209</b>	<b>74.282.038</b>	<b>9.502.427</b>

Quelle: Eigene Darstellung

Im Mittelwert entstehen auf jedem Engpass Kosten von ca. 300.000 EUR pro Jahr für die Traktionsenergie der Güterzüge, die von Fernzügen überholt werden. An der Spitze steht – bedingt durch die Länge von fast 100 km und die hohe Zugzahl – die Strecke im Oberrheintal zwischen Offenburg und Basel. Insgesamt steht als Ergebnis eine Einsparung von knapp 75 Mio. kWh an Energie mit einer Kostenersparnis von ca. 9,5 Mio. EUR fest.

Wie bereits erläutert, werden nur die geplanten Halte von Güterzügen berücksichtigt. Es ist zu erwarten, dass durch einen Ausbau der Strecke weitere Fahrstraßenkonflikte etwa durch Verspätungen wegfallen. Eine Ermittlung der dadurch anfallenden Energieeinsparungen ist im Rahmen dieser Arbeit aufgrund des hohen Aufwands einer solchen Untersuchung nicht möglich.

## 8.2.2 Implementierung der Maßnahmen

Im Rahmen einer umfassenden Modellierung kann die Trassierung der Ausbaumaßnahmen nur grob erfolgen. Viele Informationen, die für eine genauere Linienführung zu berücksichtigen wären, sind nur schwer zu erhalten, sodass die Kostenberechnung notwendigerweise ein Kompromiss aus Genauigkeit und Machbarkeit ist. Unter Verwendung des Eisenbahnatlas und Google Maps wurde ein erster Trassierungsentwurf erstellt, der hauptsächlich Länge und Anzahl der verwendeten Infrastrukturmaßnahmen enthält.

Für den einzelnen Engpass gilt es nun, die passende Ausbaumaßnahme auszuwählen. Da alle Kantenengpässe ein Problem in Bezug auf die Streckenkapazität aufweisen und durch den Mischverkehr häufig Überholungen notwendig sind, bleibt als infrastrukturelle Maßnahme nur der Ausbau der Strecke mit mehr Gleisen übrig, sofern die Möglichkeit der Blockverdichtung schon ausgeschöpft wurde oder nicht ausreichend erscheint.

## 8.2.3 Beispielstrecke Wunstorf – Minden (Strecke 1700)

Als Fallbeispiel für die Modellierung und Bewertung von Kantenengpässen wurde die Bahnstrecke zwischen Wunstorf und Minden ausgewählt, die als einer der drängendsten Engpässe im deutschen Schienennetz gilt.

**Abb. 24: Streckenplan Wunstorf – Minden**



Quelle: Birn/Mann 2010, S. 10-27

Abb. 24 zeigt einen Streckenplan des betroffenen Abschnittes. In Übereinstimmung mit dem BVWP 2003 wird eine zweigleisige Neubaustrecke als Ausbaumaßnahme gewählt. [Vgl. Birn/Mann 2010, S. 10-27]

**Tab. 34: Infrastrukturkosten Wunstorf – Minden**

Infrastrukturelement	Anzahl / Länge	Baukosten + kalk. Zinsen [ Mio. EUR]	Instandhaltungskosten p.a. [ Mio. EUR]	Gesamtkosten <sup>117</sup> [Mio. EUR]
Oberbau + Gleisbau	44,1 km	113,25	0,79	133,12
Brücken (alle)	62	41,66	1,23	72,388
Überleitstellen	4	42,62	0,26	49,22
Abzweigstelle	2	7,71	0,05	8,89
Kreuzungsbahnhof	2	7,3	0,06	8,72
Überholbahnhof	4	9,76	0,2	14,86
Überwerfungsbauwerke	4	20,8	0,3	28,34
<b>Σ</b>		<b>243,14</b>	<b>2,89</b>	<b>315,54</b>

Quelle: Eigene Darstellung

Tab. 34 zeigt die notwendigen Infrastrukturelemente und die Übersicht der Bau- und Instandhaltungskosten. Die Planung der Ausbaumaßnahme geht dabei von folgenden Annahmen aus:

- Es werden keine Bahnübergänge neu gebaut. Sämtliche Straßenquerungen werden durch Brücken ausgeführt.
- Es kann nicht genau ermittelt werden, ob bereits existierende Straßenbrücken für einen viergleisigen Ausbau ausreichen und daher nur geringe Kosten in diesen Bereichen entstehen. Sämtliche Fälle dieser Art werden als Neubau von Straßenquerungen gewertet.
- Die Linienführung erfolgt durchgängig parallel zur bestehenden Strecke. Die Problematik bei der Durchquerung von besiedelten Gebieten wird dabei nicht berücksichtigt. Neben der Thematik des Eisenbahnlärms sind Platzverhältnisse und hohe Kosten des Grunderwerbs zu beachten. Dies lässt sich

<sup>117</sup> Baukosten + kalk. Zinsen + Instandhaltungskosten für 25 Jahre

durch eine Trassierung abseits der besiedelten Gebiete abmildern, allerdings auf Kosten der betrieblichen Flexibilität, wenn die vier Gleise nicht mehr nebeneinander liegen.

- Die Kosten für die Bahnhöfe werden angesetzt, um den nötigen Ausbau der Bahnhöfe für vier durchgehende Hauptgleise einzubeziehen.

Zum Vergleich werden die Kosten der Bedarfsplanüberprüfung 2010 herangezogen, die für dieselbe Ausbaumaßnahme bei ca. einer Milliarde EUR liegen. Dies ist aber aus folgenden Erwägungen nur sehr eingeschränkt gültig:

- Es konnten nicht alle Bestandteile der Infrastrukturausbaukosten im Rahmen dieser Arbeit berücksichtigt werden.
- Die Planungsgrundlage besteht aus deutlich weniger Informationen. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Ersteller der Bedarfsplanüberprüfung 2010 über detaillierte Informationen bezüglich der Ausbauplanung verfügten.
- Als wichtigster Punkt sei genannt, dass sich die Kostenbetrachtung dieser Arbeit auf 25 Jahre bezieht (siehe Kapitel 8.1.3), bei Birn/Mann 2010 hingegen die vollen Kosten unabhängig von der technischen Lebensdauer der Infrastruktur zur Anwendung kommen.

## 8.2.4 Einschätzung der Ergebnisse

Das Gesamtergebnis für die Beispielstrecke Wunstorf – Minden ist in Tab. 35 aufgeführt.

**Tab. 35: Kostenvergleich Beispielstrecke Wunstorf - Minden**

Gesamtkosten 25 Jahre	Energie- einsparung 25 Jahre	Instandhaltungs- kosten p.a.	Energie- einsparung p.a.
[Mio. EUR]	[Mio. EUR]	[Mio. EUR]	[Mio. EUR]
315,54	10,5	2,89	0,435

Quelle: Eigene Darstellung

Bei einer vergleichenden Betrachtung der Kosten wird deutlich, dass Einsparungen bei den Energiekosten im Bereich der Kantenengpässe nur einen gerin-

gen Anteil der Kosten für die Infrastruktur ausgleichen können. Im untersuchten Beispiel liegen die jährlich eingesparten Energiekosten noch deutlich unter den notwendigen Instandhaltungskosten für die neugebaute Strecke. Selbst wenn der Tatsache Rechnung getragen wird, dass sich durch den Ausbau in den anderen Zuggattungen Energieeinsparungseffekte einstellen, bleibt der Anteil an den Gesamtkosten sehr gering. Insgesamt laufen in 25 Jahren 10,5 Mio. EUR an eingesparten Energiekosten auf und können damit 3,5 % der Gesamtkosten wettmachen. Der Großteil des Nutzens einer Ausbaumaßnahme muss also aus anderen Bereichen kommen (siehe Kapitel 8.6).

### 8.3 Engpasskategorie: Hochbelastete Knoten

In diesem Kapitel wird die Analyse des Beispielknotens aus Kap. 7.4 durchgeführt. Erster Schritt hierzu ist die Auswertung der Open-Track-Simulation.<sup>118</sup> Von diesen Ergebnissen ausgehend werden die Energieverbräuche der Zugfahrten berechnet und Einsparungen ermittelt. Um einen Vergleich mit den Ausbaukosten zu ermöglichen, werden dann Ausbaumaßnahmen auf ihre Tauglichkeit für den vorliegenden Knotenengpass geprüft und die Kosten einer solchen Maßnahme kalkuliert.

#### 8.3.1 Auswertung der Simulation

Das Hauptergebnis der Simulation ist die Anzahl der ungeplanten Halte durch Fahrstraßenkonflikte. Weiterhin sind die ungeplanten Bremsvorgänge Teil des Ergebnisses. Diese kommen dadurch zustande, dass der Triebfahrzeugführer bei haltzeigendem Signal bremsend an dieses heranfährt, um davor zum Stehen zu kommen. Sollte aber das Signal in der Zwischenzeit auf Fahrt gegangen sein und der Triebfahrzeugführer konnte dies zweifelsfrei erkennen, darf er den Bremsvorgang abbrechen<sup>119</sup> und wieder auf die erlaubte Geschwindigkeit beschleunigen. Dies verursacht natürlich zusätzlichen Energieverbrauch, auch

---

<sup>118</sup> OpenTrack legt umfangreiche Protokolle an, die mithilfe von Tabellenkalkulation und VisualBasic-Programmierung ausgewertet wurden.

<sup>119</sup> Im Rahmen dessen, was das jeweilige Zugsicherungssystem erlaubt.

wenn dieser deutlich geringer ist, als bei der Anfahrt aus dem Stand. Um diesen Verbrauch ebenfalls auswerten zu können, wurde im Rahmen der Simulation die durchschnittliche Zielgeschwindigkeit der Bremsvorgänge erfasst.

Bei der Auswertung von Simulationen dieser Art muss immer folgendes bedacht werden: OpenTrack ist eine rein technische Simulation, die sich streng an die vorgegebenen Parameter hält. Sie kann keine Dispositionsentscheidungen abbilden, womit ein wichtiger Teil der Betriebssteuerung nicht berücksichtigt wird. Ein Disponent oder Fahrdienstleiter würde steuernd eingreifen, wenn er sieht, dass ein Knoten absehbar von zu vielen Zügen gleichzeitig angefahren wird. Er könnte beispielsweise Züge, die noch stehen, warten lassen, bis sich die Betriebslage entspannt hat. OpenTrack kann diese Entscheidung nicht treffen, sodass im Simulationsergebnis mit Sicherheit mehr Halte und Bremsvorgänge entstehen als in einer vergleichbaren realen Situation.

Das Ergebnis berechnet sich aus der Differenz zwischen den Halten und Bremsvorgängen mit der niveaugleichen Kreuzung und denen, die nach dem Bau einer niveaufreien Kreuzung noch bestehen. Dabei kann es in der Simulation passieren, dass bei der niveaufreien Kreuzung Konflikte entstehen, die vorher noch nicht vorhanden waren. Pro Betriebsprogramm wurden zehn Verspätungsszenarien simuliert und die Mittelwerte daraus gebildet.

**Tab. 36: Auswertung Betriebsprogramm B1 pro Tag**

Zugart	SPFV	SPNV	SGV
Differenz Bremsvorgänge	3,8 (-10 %)	3,3 (-11 %)	3,5 (-35%)
Differenz Halte	0,8 (-5 %)	1 (-5 %)	0,4 (-2,7 %)
Differenz Verspätungsminuten	für alle Zuggattungen: 18,8 (-1,8 %)		
Zielgeschwindigkeit Bremsvorgänge	für alle Zuggattungen: 89 km/h		

Quelle: Eigene Darstellung

Es zeigt sich, dass die Beseitigung einer niveaugleichen Kreuzung eine Reduktion der Bremsvorgänge zwischen 10 und 35 % mit sich bringt (siehe Tab. 36). Die Zahl der ungeplanten Halte reduziert sich je nach Zuggattung um 2,7 bis 5 %. Die weitaus größere Anzahl der Behinderungen entsteht auf den Kanten vor

und hinter der Kreuzung bzw. beim Einfädeln der beiden Strecken auf eine einzige Strecke. Weiterhin ist zu erkennen, dass die hohe Zahl der Behinderungen auf die hohen Verspätungswahrscheinlichkeiten zurückgeht. Wenn nur selten Verspätungen auftreten und auch nur in geringer Höhe, dann ist die Anzahl der Behinderungen von beginn an klein und die Verbesserungen durch die niveaufreie Kreuzung sind sehr gering. Insgesamt wird die Entstehung von 18,8 Verspätungsminuten pro Tag verhindert. Der geringe Anteil an der Gesamtsumme der Verspätungsminuten erklärt sich aus der hohen Summe der Einbruchsverspätungen (siehe Kap. 7.4.5).

**Tab. 37: Auswertung Betriebsprogramm B2 pro Tag**

Zugart	SPFV	SPNV	SGV
Differenz Bremsvorgänge	0,6	1	0
Differenz Halte <sup>120</sup>	-0,2	0	0
Differenz Verspätungsminuten	für alle Zugkategorien: 1,2 (-0,25 %)		
Zielgeschwindigkeit Bremsvorgänge	für alle Zugkategorien: 91 km/h		

Quelle: Eigene Darstellung

Die Auswertung für das Betriebsprogramm B2 sind in Tab. 37 festgehalten. Die Differenz zwischen den Halten und Bremsvorgängen vor bzw. nach dem Ausbau ist sehr gering. Im Falle des Fernverkehrs wurde nach dem Ausbau sogar mehr gebremst als mit der höhengleichen Kreuzung. Auch die Verspätungsminuten verändern sich kaum. Mit einer Abnahme von 0,25 % liegt dieser Wert noch im Bereich zufälliger Veränderungen. Ursächlich für die geringen Effekte sind die deutlich kleineren Zugzahlen im Vergleich zum Betriebsprogramm B1 und die damit einhergehende geringere Wahrscheinlichkeit für gegenseitige Behinderungen.

Die Simulation wurde für die Betriebsprogramme B1 und B2 durchgeführt. Die Auswertung von B2 ergibt, dass es aufgrund der sehr geringen Auswirkungen nicht sinnvoll ist, die Simulation mit weniger Zügen (B3) nochmals durchzuführen.

<sup>120</sup> Eine negative Differenz bedeutet eine Zunahme der Halte



### 8.3.2 Ergebnisberechnung Energieverbrauch

Mit dem Ergebnis der Simulation können nun die Einsparungen beim Energieverbrauch berechnet werden. Die Zughalte und Bremsvorgänge werden auf ein Jahr hochgerechnet und auf Basis der in Kapitel 3 entwickelten Energiebedarfsberechnung in kWh umgerechnet. Aufgrund der geringen Auswirkungen eines Knotenausbaus unter Annahme des Betriebsprogrammes B2 wird die Energieberechnung nur für das Betriebsprogramm B1 durchgeführt.

Tab. 38 zeigt die Energieeinsparungen, die durch eine Beseitigung der niveaugleichen Kreuzung möglich sind. Dabei bezeichnet  $E_{b(Kn)}$  den gesamten Energiemehrbedarf durch Beschleunigen. Davon muss aber noch die Energie abgezogen werden, die für das Beharren auf dem Abschnitt verbraucht wird, auf dem bisher gebremst wurde  $E_{Brems(Kn)}$ . Ebenso muss die Energie abgezogen werden, die durch den Bremsvorgang rückgespeist wurde  $E_{Rück(Kn)}$ . Mehr als die Hälfte der eingesparten Energie entfällt auf den Fernverkehr, der aufgrund seiner höheren Maximalgeschwindigkeit eine größere Geschwindigkeitsdifferenz zur Zielgeschwindigkeit der Bremsvorgänge besitzt. Der SPNV liegt im Einsparungspotential trotz der hohen Zugzahlen deutlich hinter dem Güterverkehr zurück. Dies lässt sich durch die hohe Masse erklären, die der Güterzug gegenüber dem Nahverkehrszug besitzt.

**Tab. 38: Energieeinsparungen Knoten pro Jahr**

Kategorie	$E_{b(Kn)}$ [in kWh]	$E_{Brems(Kn)}$ [in kWh]	$E_{Rück(Kn)}$ [in kWh]	$E_{Kn}$ [in kWh]
SPFV	237.012	7.531	23.701	205.779
SPNV	43.966	3.371	5.715	34.879
SGV	95.041	5.625	4.752	84.664
<b><math>\Sigma</math></b>	<b>376.020</b>	<b>18.868</b>	<b>34.168</b>	<b>325.323</b>

Quelle: Eigene Darstellung

Aus den gewonnenen Erkenntnissen über die Energieverbräuche lassen sich die jährlichen Kosteneinsparungen berechnen. In Tab. 39 sind neben den Energiekosten für die einzelnen Zugkategorien auch die Einnahmen durch Energierück-

speisungen verzeichnet. Da durch die wegfallenden Bremsvorgänge und Zughalte diese Einnahmen nicht mehr vorhanden sind, werden sie in der Kostenberechnung berücksichtigt. Insgesamt bleiben dann 42.275 EUR als Kosteneinsparungen pro Jahr im Bereich der Traktionsenergie übrig.

**Tab. 39: Kostenersparnis Knoten pro Jahr**

Zugkategorie	$K_{\text{Bezug}(Kn)}$ [in EUR]	$K_{\text{Rück}(Kn)}$ [in EUR]	$K_{\text{Str}(Kn)}$ [in EUR]
SPFV	28.822	1.995	26.827
SPNV	5.098	481	4.617
SGV	11.230	400	10.830
<b><math>\Sigma</math></b>	<b>45.152</b>	<b>2.877</b>	<b>42.275</b>

Quelle: Eigene Darstellung

Die bisher berechneten Werte basieren auf den Höchstgeschwindigkeiten von 160 km/h für den SPFV und 120 km/h für den SPNV. Um die Auswirkungen von Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen den einzelnen Zugkategorien zu untersuchen, wurde eine weitere Berechnung mit einer Höchstgeschwindigkeit von 200 km/h im SPFV und 160 km/h im SPNV durchgeführt und ausgewertet.<sup>121</sup> Die Ergebnisse sind in Tab. 40 verzeichnet.

**Tab. 40: Kostenersparnis Knoten (200 km/h) pro Jahr**

Zugkategorie	$K_{\text{Str}(Kn,160)}$ [in EUR]	$K_{\text{Str}(Kn,200)}$ [in EUR]
SPFV	26.827	46.405
SPNV	4.617	8.531
SGV	10.830	10.830
<b><math>\Sigma</math></b>	<b>42.275</b>	<b>65.767</b>

Quelle: Eigene Darstellung

<sup>121</sup> Für diese Berechnung wurde nicht die komplette Simulation nochmals durchgeführt, sondern lediglich die Höchstgeschwindigkeiten der Auswertetabelle angepasst. Eine angepasste Simulation würde vermutlich noch mehr gegenseitige Behinderungen der Züge ergeben und damit die potentielle Energieeinsparung noch erhöhen.

Die Veränderung der Höchstgeschwindigkeiten zeigt eine deutliche Auswirkung in den Energieverbräuchen und damit in den Kosteneinsparungen. Diese liegen im angenommenen Fall bei mehr als 50 % über dem bisherigen Wert, obwohl die Steigerung der Höchstgeschwindigkeit nur 25 % beträgt und der Güterverkehr gar nicht verändert wurde. Hauptgrund dafür ist der große Anteil des Luftwiderstandes an den Fahrwiderständen im hohen Geschwindigkeitsbereich (siehe Kapitel 3.1.1.3). Daraus lässt sich der Schluss ziehen, dass Knoten mit hohen Zugzahlen bei gleichzeitig stark inhomogenen Zuggeschwindigkeiten besonders prädestiniert für differenzierte Knotenanalysen sind. Der Einfluss der Eingangsparameter auf das Ergebnis ist im Bereich der gefahrenen Geschwindigkeiten besonders hoch, was die Wichtigkeit einer genauen Einzeluntersuchung mit den tatsächlich vorliegenden Betriebsprogrammen und Fahrdynamikdaten unterstreicht.

### **8.3.3 Implementierung der infrastrukturellen Maßnahmen**

Da der Engpass des untersuchten Knotens in der niveaugleichen Kreuzung liegt, wird zur Verbesserung ein Überwerfungsbauwerk geplant. Es wird auf die in Kapitel 6.2.3.3 ermittelten Kostensätze zurückgegriffen, die einen festen Kostensatz für ein Überwerfungsbauwerk beinhalten. Die tatsächlichen Kosten können abhängig von den örtlichen Gegebenheiten deutlich abweichen. Da ein Bauwerk dieser Art eine bestimmte Entwicklungslänge für die Erreichung der Kreuzungshöhe erfordert, kann ein Bau in dicht besiedelten Gebieten sehr problematisch sein.

Je nach Art des Knotens kann die gewählte Infrastrukturmaßnahme sehr unterschiedlich ausfallen. Für den Beispielknoten stellt das Überwerfungsbauwerk aber die einzig sinnvolle Maßnahme aus dem in Kapitel 6 erstellten Maßnahmenkatalog dar. Die Infrastrukturkosten für das geplante Überwerfungsbauwerk sind in Tab. 41 zusammengestellt.

**Tab. 41: Infrastrukturkosten Beispielknoten**

Infrastrukturelement	Anzahl / Länge	Baukosten + kalk. Zinsen [ Mio. EUR]	Instandhal- tungskosten p.a. [ Mio. EUR]	Gesamt- kosten <sup>122</sup> [Mio. EUR]
Überwerfungsbauwerk	1	5,2	0,08	7,1

Quelle: Eigene Darstellung

### 8.3.4 Einschätzung der Ergebnisse

Das Ergebnis für den Beispielknoten ist in Tab. 42 zusammengestellt. Die Betrachtung der jährlich anfallenden Kosten zeigt, dass die Einsparungen im Bereich der Traktionsenergie ca. 50 % der jährlichen Instandhaltungsaufwendungen ausmachen. Da Knotenausbauten sehr gezielt einen Engpass auf begrenztem Raum beheben, ist der Anteil der Energieeinsparung an den Gesamtkosten mit knapp 15 % deutlich höher als bei einem Kantenengpass.

**Tab. 42: Kostenvergleich Beispielknoten**

Gesamtkosten 25 Jahre [Mio. EUR]	Energieeinsparung 25 Jahre [Mio. EUR]	Instandhaltungs- kosten p.a. [ Mio. EUR]	Energieeinsparung p.a. [Mio. EUR]
7,1	1	0,085	0,042

Quelle: Eigene Darstellung

Die Untersuchung hat gezeigt, dass eine generelle Aussage über die Engpässe in Knoten nur sehr eingeschränkt möglich ist. Je nach Aufgabe, Größe, Gleisanzahl und Betriebsprogramm sind die infrastrukturellen Gegebenheiten völlig unterschiedlich. Selbst Knoten ähnlicher Größe mit ähnlichen betrieblichen Aufgaben können eine sehr unterschiedliche Infrastrukturgestaltung aufweisen [Vgl. Bendfeldt 2005, S. 18]. Aufgrund dieser Tatsache konnte im Rahmen dieser Arbeit nur die grundsätzliche Vorgehensweise erarbeitet und als Anwendungsbeispiel ein fiktiver Knoten untersucht werden. Eine Einteilung und genaue Untersuchung sämtlicher Knotenarten muss daher an anderer Stelle erfolgen<sup>123</sup>.

<sup>122</sup> Baukosten + kalk. Zinsen + Instandhaltungskosten für 25 Jahre

<sup>123</sup> Für detaillierte Knotenbetrachtungen sei verwiesen auf Bendfeldt 1999, Bendfeldt 2005, Fengler/Böttcher 2007.

In der Knotenbetrachtung war auch eine Erhebung der Verspätungen innerhalb der Simulation enthalten. Der Ausbau des Knotens bringt neben der Energieeinsparung auch eine Vermeidung von insgesamt 6.863 Verspätungsminuten pro Jahr. Diese Verspätungsminuten sind in Tab. 43 zusammengestellt und nach den Zuggattungen gegliedert.

**Tab. 43: Vermiedene Verspätungsminuten Knoten**

Zugkategorie	Verspätungsminuten pro Tag	Verspätungsminuten pro Jahr
SPFV	8,3	3.030
SPNV	4,4	1.606
SGV	6,1	2.227
<b><math>\Sigma</math></b>	<b>18,8</b>	<b>6.863</b>

Quelle: Eigene Darstellung

Für eine Bewertung der Verspätungen ist diese Aufteilung notwendig, allerdings ist eine Monetarisierung schwierig<sup>124</sup>. Da keine Kostensätze für die Verspätungsminuten der einzelnen Zuggattungen verfügbar waren und auch eine Errechnung aus anderen Daten nicht möglich war, findet keine monetäre Bewertung für diesen Aspekt statt.

## 8.4 Engpasskategorie: La-Stellen

Es folgt die Berechnung des Energiemehrverbrauchs sowie die Implementierung der infrastrukturellen Maßnahmen für die in Kapitel 5.2.1 und 5.2.4 beschriebenen La-Stellen.

### 8.4.1 Ergebnisberechnung

Es folgt die Ergebnisberechnung nach der Gleichung (8.1). Die Ergebnisse werden in Tab. 44 aufgeführt. Der für den SPFV im Vergleich zu den anderen Zugkategorien sehr niedrige Wert basiert auf der geringen Anzahl an Zügen dieser

<sup>124</sup> Es existieren Schätzverfahren wie in Fengler/Böttcher 2007. Leider wird ein solches Verfahren dort nicht erläutert.

Kategorie, die die La-Stellen passieren. Denn fast alle aufgelisteten La-Stellen befinden sich auf schwach befahrenen Nebenstrecken, auf denen kein Fernverkehr stattfindet.

**Tab. 44: Absoluter Energiemehrbedarf durch die La-Stellen pro Tag**

Zugkategorie	$E_{b(La)}$ [in kWh]	$E_{f(La)}$ [in kWh]	$E_{Brems(La)}$ [in kWh]	$E_{Rück(La)}$ [in kWh]	$E_{La}$ [in kWh]
SPFV	12.476	398	328	1.034	10.716
SPNV	33.136	1.801	2.777	1.968	27.290
SGV	95.310	5.925	5.592	1.164	82.629
<b><math>\Sigma</math></b>	<b>140.922</b>	<b>8.124</b>	<b>7.997</b>	<b>4.166</b>	<b>120.635</b>

Quelle: Eigene Darstellung

Die absoluten Werte müssen nun mit den täglichen Zugzahlen, die alle La-Stellen passieren, verknüpft werden. Die Summe beträgt 3.594 Züge. Auf die einzelnen Zugkategorien aufgeteilt, ergeben sich folgende Werte:

- Zugkategorie SPFV: 210
- Zugkategorie SPNV: 2.202
- Zugkategorie SGV: 1.182

Wie in Tab. 45 dargestellt, weist die Zugkategorie SPNV mit durchschnittlich 12,39 kWh pro Zug den niedrigsten Energiemehrbedarf pro Zug auf. Das widerspricht zwar theoretisch den Ergebnissen aus der Verifikation (siehe Kapitel 3.2.2.2), doch kann dieser Umstand einfach geklärt werden. In der Verifikation musste die Zugkategorie SPNV häufig halten, das ständige Abbremsen und Beschleunigen hat den spezifischen Energiebedarf in die Höhe getrieben. In der Engpasskategorie La-Stelle aber muss nur einmalig die Geschwindigkeit reduziert werden. Damit fällt eine treibende Größe aus der Verifikation weg. Somit besitzt der im Vergleich zum SGV deutlich leichtere und im Vergleich zum SPFV auch langsamere SPNV-Beispielzug einen Vorteil, der sich in einem geringeren Energiemehrbedarf äußert, während der durchschnittliche Energiemehrbedarf für die beiden Zugkategorien SPFV und SGV deutlich höher ist. Die Begründung beim SGV liegt einzig in der hohen Masse, die nach dem Passieren der La-Stelle

wieder beschleunigt werden muss. So weist der hier verwendete Güterzug mit 1.600 t rund 750% mehr Masse auf als der Beispielzug der Zugkategorie SPNV. Der höhere Durchschnittsenergiemehrbedarf beim SPFV basiert auf einer Kombination aus höherem Gewicht und einer größeren Differenzgeschwindigkeit zwischen der Strecke und der La-Stelle im Vergleich zum SPNV.

**Tab. 45: Relativer Energiemehrbedarf durch die La-Stellen pro Zug & Tag**

Zugkategorie	$E_{b(La)}$ [kWh/Zug]	$E_{f(La)}$ [kWh/Zug]	$E_{Brems(La)}$ [kWh/Zug]	$E_{Rück(La)}$ [kWh/Zug]	$E_{La}$ [kWh/Zug]
SPFV	59,41	1,89	1,56	4,92	51,03
SPNV	15,05	0,82	1,26	0,89	12,39
SGV	80,63	5,01	4,73	0,98	69,91

Quelle: Eigene Darstellung

Die Ergebnisse aus der Tab. 44 können nun mit den eingangs genannten Energiepreisen (siehe auch Tab. 32) zusammengeführt werden. Das Ergebnis ist in Tab. 46 aufgeführt. So verursacht eine La-Stelle für einen Zug der Kategorie SPFV durchschnittlich Mehrkosten in Höhe von rund 6,61 EUR, ein Zug der Kategorie SPNV ca. 1,59 EUR und ein Zug der Kategorie SGV gerundet 8,82 EUR.

**Tab. 46: Absolute Energiemehrkosten aller La-Stellen pro Tag**

Zugkategorie	$K_{La(Bezug)}$ [in EUR]	$K_{La(Rück)}$ [in EUR]	$K_{La}$ [in EUR]
SPFV	1.476	87	1.389
SPNV	3.675	166	3.509
SGV	10.524	98	10.426
$\Sigma$	<b>15.675</b>	<b>351</b>	<b>15.324</b>

Quelle: Eigene Darstellung

## 8.4.2 Implementierung der infrastrukturellen Maßnahmen

Der nächste Schritt besteht in der Implementierung der entsprechenden infrastrukturellen Maßnahmen, welche im Kapitel 6 beschrieben wurden. Dazu müssen die ermittelten La-Stellen nach ihrer Mangelkategorie sortiert werden.

Die DB gibt insgesamt elf Mangelkategorien an [Vgl. Bundestag 2014, S. 4-7; Vgl. Bundestag 2015, S. 33 ff.]:

- |                         |                            |
|-------------------------|----------------------------|
| 1. Oberbaumangel        | 7. Schaden Hochwasser 2013 |
| 2. Untergrundmangel     | 8. Reisendensicherung      |
| 3. Böschungsmangel      | 9. Schleppkurve            |
| 4. LST-Mangel           | 10. behördliche Anordnung  |
| 5. Brückenmangel        | 11. Sonstiges              |
| 6. eingeschränkte Sicht |                            |

Die Tab. 47 listet auf, welche und wie viele La-Stellen einer Mangelkategorie zugeordnet sind und wie hoch der tägliche Energiemehrbedarf der jeweiligen La-Stellen-Kategorie ist. Dabei wurden einige Veränderungen in Bezug zur Mangelkategorisierung der DB vorgenommen. So wurde die Mangelkategorie „Mangel an Böschung“ zu der Kategorie „Oberbaumangel“ hinzugefügt, da diese sich ähneln und keine vertiefenden Informationen zur genauen Art des Mangels ermittelt werden konnte.

**Tab. 47: Gruppierung der La-Stellen nach Mangelkategorie**

Mangelkategorie	lfd. Nr. der La-Stellen	Anzahl La-Stellen	Energiemehrbedarf pro Tag
Mangel am Oberbau	5, 6, 39, 40, 57-66	14	33.477 kWh
Mangel am Untergrund	1, 4	2	21.859 kWh
Mangel an der LST	21, 36, 37, 56, 70, 71, 79, 80	8	13.818 kWh
Brückenmangel	30-33, 52-55, 74-78	13	26.441 kWh
eingeschränkte Sicht	9-12, 22, 29, 38, 41-43, 51	11	2.901 kWh
Hochwasser 2013	67, 68	2	6.348 kWh
Reisendensicherung	19, 20, 72, 73	4	1.784 kWh
Schleppkurve	13-18, 34, 35, 46, 47, 50	11	2.607 kWh
behördliche Anordnung	48, 49	2	7.653 kWh
Sonstiges	2, 3, 7, 8, 23-28, 44, 45, 69	13	3.746 kWh

Quelle: Eigene Darstellung



Es zeigt sich, dass die Mangelkategorie „Oberbaumangel“ am häufigsten auftritt, gefolgt von „Brückenmangel“ und „Sonstiges“. Die Mängel im Oberbau weisen zudem mit Abstand den höchsten Energiemehrbedarf pro Tag auf. Erwähnenswert ist noch der Umstand, dass, obwohl nur mit zwei La-Stellen vertreten, die Mangelkategorie Untergrundmangel den dritthöchsten Energiemehrbedarf aufweist. Die Ursache liegt in der hohen Anzahl an täglichen Zügen, welche die beiden La-Stellen passieren. Die Häufigkeit der Mangelkategorie „Sonstiges“ ist für die Entwicklung von Lösungsansätzen ungünstig, da nicht bekannt ist, welche Art Mangel den La-Stellen zugrunde liegt. Folglich werden diese La-Stellen bei der nachfolgenden Implementierung der infrastrukturellen Maßnahmen auch nicht berücksichtigt. Ebenso können die La-Stellen der Kategorien „Hochwasser 2013“ und „Behördliche Anordnung“ nicht mit berücksichtigt werden, da auch hier keine genauen Informationen zu Art und Umfang der Mängel vorliegen. Dies ist umso bedauerlicher, als diese drei Mangelkategorien zusammen einen täglichen Energiemehrbedarf von rund 17.747 kWh<sup>125</sup> erzeugen und damit rund 2.229 EUR Mehrkosten am Tag verursachen.

Bei der Berechnung der Kosten für die jeweiligen infrastrukturellen Maßnahmen werden die Kostensätze aus Kapitel 6 verwendet. Dazu ist anzumerken, dass im ersten Jahr der Investition keine Instandhaltung durchgeführt wird. Zudem werden zu der jeweiligen infrastrukturellen Maßnahme passende Betrachtungszeiträume verwendet. Diese unterscheiden sich von den in Kapitel 8.1.3 genannten Betrachtungszeiträumen.

Eine Übersicht über die Kosten und Ersparnisse für jede Mangelkategorie findet sich in Tab. 55. Zudem wird der Kostenverlauf über die jeweilige gesamte technische Lebensdauer pro Mangelkategorie in der Tabelle des digitalen Anhang 13\_La-Stellen\_Kostenrechner\_Maßnahmen.xlsx dargestellt.

---

<sup>125</sup> Dies entspricht rund 15 % des Gesamtenergiemehrbedarfs, der ermittelt werden konnte.

#### 8.4.2.1 Mangelkategorie: Oberbaumangel

Für eine La-Stelle aufgrund eines Mangels im Oberbau kommen mehrere Ursachen in Betracht. So kann es beispielsweise zu einer Gleislageveränderung infolge der Belastungen aus dem Zugverkehr kommen. Die Bettung kann durch Umwelteinflüsse verunreinigt werden. Daraufhin kann durch das stattfindende Pflanzenwachstum die Elastizität der Bettung verringert werden. Weitere Folgen des Zugbetriebs können Verschleiß an der Schiene, Riffelbildung<sup>126</sup> und Rollkontaktermüdung<sup>127</sup> sein. Auch eine Beschädigung der Schwellen kann zu einem Mangel im Oberbau führen. [Vgl. Lienau 2007, S. 244 ff.]

Der tägliche Energiemehrbedarf dieser 14 La-Stellen liegt bei 33.477 kWh, welcher Kosten in Höhe von 4.205 EUR verursacht. Werden diese täglichen Kosten auf ein Jahr hochgerechnet, ergibt dies 1.534.720 EUR.

Im Kapitel 6.1.1 wurde für die Infrastrukturkategorie Oberbau ein Baukostensatz von 565 EUR/m, sowie ein jährlicher Instandhaltungssatz von 5 EUR/m angegeben. Die in Tab. 47 für diese Mangelkategorie aufgelisteten La-Stellen haben zusammen eine Gesamtlänge von 5.208 m. Damit betragen die Baukosten rund 2,9 Mio. EUR. Die jährlichen Kosten für die kalkulatorischen Zinsen betragen 235.402 EUR und für die Instandhaltung 26.040 EUR.

**Tab. 48: Amortisationsdauer für die Investitionen zur Beseitigung der La-Stellen in der Mangelkategorie "Oberbaumangel"**

Jahr	Baukosten [in EUR]	kalk. Zinsen [in EUR]	Instandhaltungskosten [in EUR]	Kosteneinsparung [in EUR]	Restwert [in EUR]
1	-2.942.520	-235.402	0	1.534.720	-1.643.202
2	0	-235.402	-26.040	1.534.720	-369.932
3	0	-235.402	-26.040	1.534.720	903.355

Quelle: Eigene Darstellung

<sup>126</sup> Riffel sind periodische Fahrflächenunebenheiten [Vgl. Hempe/Siefer 2007, S. 5].

<sup>127</sup> Die Rollkontaktermüdung stellt ein Dauerfestigkeitsversagen des Schienenwerkstoffes infolge hoher Spannungsverläufe dar. Dabei können sich sowohl das Rad als auch die Schiene plastisch verformen, was sich in oberflächennahen Rissen auf der Schiene äußert. Die Rollkontaktermüdung stellt ein zunehmendes Problem bei der Instandhaltung von Schienen dar. [Vgl. Lichtberger 2010, S. 123 f.; Vgl. Hempe/Siefer 2007, S. 6 f.]

Die Auflistung in Tab. 48 zeigt die zeitliche Dauer bis zur Amortisation der Investitionen auf. Es ist zu erkennen, dass sich bereits im dritten Jahr die Investitionen in die Erneuerung des Oberbaus amortisiert haben. Wird nun die in Kapitel 6.1.1 angegebene technische Lebensdauer von 40 Jahren betrachtet, ergeben sich Gesamtkosten von rund 13,4 Mio. EUR. Diesen Kosten steht eine monetär ausgedrückte Energieersparnis in Höhe von ca. 61,4 Mio. EUR gegenüber. Das ergibt eine Gesamtersparnis von gut 48,0 Mio. EUR in 40 Jahren, bzw. eine jährliche Gesamtersparnis von rund 1,2 Mio. EUR.

#### **8.4.2.2 Mangelkategorie: Untergrundmangel**

Mängel im Untergrund sind vor allem an immer wiederkehrenden Gleislagefehlern, Schlamm- und Spritzstellen, Frosthebungen und -aufbrüchen, seitlichem Herausdrücken des aufgeweichten Untergrundes und an Verformungen des Erdplanums durch Schottersäcke und Mulden zu erkennen [Vgl. Lichtberger 2010, S. 202].

Diese Mangelkategorie enthält zwei La-Stellen, die einen Energiemehrdarf von 21.859 kWh pro Tag aufweisen. Dies führt zu täglichen Kosten in Höhe von gut 2.745 EUR, bzw. zu jährlichen Kosten von 1.002.104 EUR.

Im Kapitel 6.1.2 wurde für die Infrastrukturkategorie Tiefbau ein Baukostensatz von 565 EUR/m angegeben. Die beiden La-Stellen kommen zusammen auf eine Gesamtlänge von 800 m (siehe Anhang 9). Das führt zu einer Gesamtinvestition von 452.000 EUR. Die kalkulatorischen Zinsen fallen jährlich mit 36.160 EUR an. Wie zudem im Kapitel 6.1.2 erläutert, werden für den Untergrund keine Instandhaltungskosten angesetzt.

Die Tab. 49 zeigt, dass sich bereits im ersten Jahr der Investition diese amortisieren, da die Kosteneinsparung durch den verringerten Energiebedarf im Vergleich zu der Investition sehr groß ist. Dies lässt sich u.a. durch die hohe Zuganzahl erklären, da in Summe 378 Züge die beiden La-Stellen befahren (siehe Anhang 11).

**Tab. 49: Amortisationsdauer für die Investitionen zur Beseitigung der La-Stellen in der Mangelkategorie Untergrundmangel**

Jahr	Baukosten [in EUR]	kalk. Zinsen [in EUR]	Instandhaltungskosten [in EUR]	Kosten-einsparung [in EUR]	Restwert [in EUR]
1	-452.000	-36.160	0	1.002.104	513.944

Quelle: Eigene Darstellung

Wird nun der Zeitraum der technischen Lebensdauer eines Untergrunds betrachtet, ergeben sich für die 80 Jahre Gesamtkosten in Höhe von rund 3,3 Mio. EUR, denen eine Kostenersparnis von ca. 80,1 Mio. EUR gegenübersteht. Die Gesamtersparnis beträgt damit rund 76,8 Mio. EUR. Das ergibt eine durchschnittliche Jahresersparnis in Höhe von rund 960.000 EUR.

#### **8.4.2.3 Mangelkategorie: LST-Mangel**

Ein LST-Mangel kann ein technischer Defekt einer LST-Komponente sein oder eine mangelhafte technische Ausstattung. So muss beispielsweise ein BÜ einer Nebenbahn mit 20 km/h befahren werden, wenn die Übersicht über den BÜ mangelhaft ist und nur mittels akustischer Signale das Herannahen eines Zuges mitgeteilt werden kann [Vgl. EBO § 11 (7)]. Um die im Kapitel 6.1.5 aufgeführten Kostensätze korrekt verwenden zu können, ist vorher zu prüfen welche La-Stelle welche Art von LST-Mangel aufweist. Da für die einzelnen La-Stellen keine weiterführenden Informationen zu ihrer Art des LST-Mangels existieren, müssen entsprechend sinnvolle Annahmen getroffen werden. Dazu helfen vor allem die Länge der La-Stelle sowie die Angabe über die vorhandene Geschwindigkeitsreduzierung. Wie eingangs beschrieben, ist die Verringerung der Geschwindigkeit auf 20 km/h ein starkes Indiz auf einen Mangel mit einem BÜ (siehe auch Kapitel 6.1.5). Folglich fallen für die La-Stellen Nr. 36, 37 und 56 die Kostensätze für die Beschränkung eines BÜ an. Die anderen fünf La-Stellen werden aufgrund von fehlenden, aber für eine im Ansatz genaue Berechnung notwendigen Informationen nicht betrachtet, da keine schlüssige Lösungsmaßnahme entwickelt werden konnte. Dies ist umso bedauerlicher, als diese La-Stellen den Großteil des Energiemehrbedarfs in dieser Mangelkategorie ausma-

chen. Bei den verbleibenden La-Stellen ist zu beachten, dass die La-Stellen Nr. 36 und 37 gemeinsam einen BÜ darstellen. Zusammen mit der La-Stelle Nr. 56 weisen diese beiden BÜ einen täglichen Energiemehrbedarf von rund 727 kWh auf, welcher 94 EUR an täglichen Kosten verursacht. Auf ein Jahr hochgerechnet ergibt dies Energiemehrbedarfskosten in Höhe von 34.310 EUR.

Werden die in Kapitel 6.1.5 beschriebenen Kostensätze verwendet, ergibt dies für die zwei zu erneuernden Bahnübergänge eine Gesamtbausumme von 1.017.000 EUR. Da diese Maßnahmen der Erhöhung der Sicherheit dienen, muss nach dem Eisenbahnkreuzungsgesetz die DB Netz nur 33 % der Investitionskosten aufbringen [Vgl. EKrG §3 (3), §13 (1)]. Folglich betragen die einmaligen anteiligen Baukosten 339.000 EUR, zuzüglich der jährlichen Kosten für die kalkulatorischen Zinsen mit 27.120 EUR und für die Instandhaltung mit 9.000 EUR pro Jahr.

Die Tab. 50 zeigt auf, dass selbst bei einer Drittelung der Kosten eine Amortisierung innerhalb der technischen Lebensdauer nicht erreicht wird. Dies erscheint logisch, da die Kosteneinsparung durch den verringerten Energiemehrbedarf unter der Summe aus kalkulatorischen Zinsen sowie den jährlichen Instandhaltungskosten liegt.

**Tab. 50: Amortisationsdauer für die Investitionen zur Beseitigung der La-Stellen in der Mangelkategorie LST – Beschränkung BÜ**

Jahr	Baukosten [in EUR]	kalk. Zinsen [in EUR]	Instandhaltungskosten [in EUR]	Kosteneinsparung [in EUR]	Restwert [in EUR]
1	-339.000	-27.120	0	34.310	-331.810
2	0	-27.120	-9.000	34.310	-333.620
3	0	-27.120	-9.000	34.310	-335.430
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
23	0	-27.120	-9.000	34.310	-371.630
24	0	-27.120	-9.000	34.310	-373.440
25	0	-27.120	-9.000	34.310	-375.250

Quelle: Eigene Darstellung

In Kapitel 6.1.5 wurde für einen BÜ eine technische Lebensdauer von 25 Jahren festgelegt. In diesen 25 Jahren entstehen Gesamtkosten in Höhe von rund 1,2 Mio. EUR. In diesem Zeitraum ergeben sich dazu Kosteneinsparungen durch den verringerten Energiebedarf von gut 858.000 EUR. Das ergibt einen Gesamtverlust in Höhe von rund 375.000 EUR. Auf ein Jahr heruntergebrochen, ergibt dies einen Durchschnittsverlust von rund 15.000 EUR pro Jahr.

#### 8.4.2.4 Mangelkategorie: Brückenmangel

In dieser Kategorie weisen die 13 La-Stellen einen täglichen Energiemehrdarf von 26.441 kWh auf, welcher sich in täglichen Kosten in Höhe von 3.321 EUR äußert. Für ein Jahr ergibt das 1.212.161 EUR.

Da die Längenangaben der La-Stellen nicht den Längen der betroffenen Brücke entsprechen müssen, wurde mithilfe des Eisenbahnatlas und Google Maps die ungefähre Länge der entsprechenden Brücke ermittelt. Die Recherche ergab, dass es sich um fünf verschiedene Brücken mit einer Gesamtlänge von 80 m handelt. Nach den Kostensätzen aus Kapitel 6.1.6 ergibt dies ein Baukostenvolumen von rund 2,5 Mio. EUR. Die jährlichen kalkulatorischen Zinsen belaufen sich dabei auf 198.880 EUR und die Instandhaltungskosten betragen 22.000 EUR pro Jahr. Die Tab. 51 zeigt dabei auf, dass sich die Investitionen in die Brückenerneuerungen gegen Ende des dritten Jahres amortisiert haben.

**Tab. 51: Amortisationsdauer für die Investitionen zur Beseitigung der La-Stellen in der Mangelkategorie Brücken**

Jahr	Investitionskosten [in EUR]	kalk. Zinsen [in EUR]	Instandhaltungskosten [in EUR]	Kosteneinsparung [in EUR]	Restwert [in EUR]
1	-2.486.000	-198.880	0	1.212.161	-1.472.719
2	0	-198.880	-22.000	1.212.161	-481.438
3	0	-198.880	-22.000	1.154.860	509.843

Quelle: Eigene Darstellung

Werden die Werte in Bezug zur in Kapitel 6.1.6 angegebenen technischen Lebensdauer von 90 Jahren gesetzt, ergibt dies für den betrachteten Zeitraum Kos-

ten in Höhe von rund 22,3 Mio. EUR. Dem stehen Kosteneinsparungen von gut 109,1 Mio. EUR gegenüber. Die Gesamtersparnis in über 90 Jahren beträgt damit rund 86,7 Mio. EUR. Das ergibt eine durchschnittliche Jahresersparnis in Höhe von ca. 964.000 EUR.

#### **8.4.2.5 Mangelkategorie: eingeschränkte Sicht**

Die elf La-Stellen, welche sich alle auf eingleisigen Strecken befinden, erzeugen einen Energiemehrbedarf von 2.901 kWh pro Tag, welcher Kosten in Höhe von 364 EUR verursacht. Auf ein Jahr hochgerechnet ergibt dies Kosten von 132.993 EUR.

Die Schwierigkeit bei der Entwicklung von passenden Maßnahmen zur Beseitigung der La-Stelle lag in dem Umstand, dass keine Fachliteratur gefunden wurde, die sich dieser Thematik annimmt. Daher wurde mit Google Maps jede angegebene La-Stelle analysiert und versucht den Grund für die eingeschränkte Sicht zu benennen. So ergab die Recherche, dass neun der elf La-Stellen aufgrund einer eingeschränkten Sicht durch einen Baum bzw. durch Baumgruppen bestehen, wobei davon wiederum zwei La-Stellen durch denselben Baum verursacht werden. Die La-Stelle mit der Nr. 9 besteht aufgrund eines Fabrikgebäudes, welches die Sicht auf die dahinterliegende Kurve verdeckt, die andere La-Stelle mit der Nr. 38 besteht aufgrund der Sichteinschränkung durch eine Böschung von einer über die Schienenstrecke führenden Bundesstraße. Da für diese beiden La-Stellen der Aufwand zur Beseitigung der eingeschränkten Sicht sehr komplex und nur sehr schwer monetär zu bewerten ist, werden diese nicht betrachtet. Folglich werden die Beseitigungsmaßnahmen nur auf die La-Stellen angewendet, bei denen Bäume die Sichteinschränkung verursachen.

Für einen durchschnittlichen Baum von bis zu 20 m Höhe ist für jeden Baummeter mit Kosten in Höhe von rund 34 EUR zu rechnen (Vgl. Bremer Baumfällung o.J.). Diese Werte ließen sich auch aus Gartenbauforen bestätigen. Daher wird in dieser Arbeit für die Fällung und Entsorgung eines Baumes mit einem pauschalen Kostensatz von 700 EUR gerechnet.

Drei der neun La-Stellen werden durch insgesamt vier Bäume verursacht. Drei weitere La-Stellen werden durch eine ganze Baumreihe begründet, die Anzahl der betroffenen Bäume liegt bei diesen La-Stellen bei rund 25 Bäumen. Weitere drei La-Stellen werden durch einen dichten Waldabschnitt ausgelöst, bei denen eine Vielzahl an Bäumen entlang der Bahnstrecke gefällt werden müsste. Die Recherche via Google Maps ergab eine ungefähre Anzahl von rund 100 Bäumen, die je La-Stelle gefällt werden müssten, in Summe also rund 300 Bäume. Werden nun alle zu fällenden Bäume zusammengefasst, ergibt sich eine Summe von 329 zu fällenden Bäumen. Mit den oben genannten Kosten von 700 EUR pro Baum, führt dies zu Gesamtkosten in Höhe von 230.300 EUR. Die pauschalen Planungskosten, welche hinzugefügt werden müssen, betragen 29.939 EUR, die kalkulatorischen Zinsen 18.424 EUR pro Jahr. Instandhaltungskosten fallen nicht an. In Tab. 52 ist erkennbar, dass sich die Investition nach drei Jahren amortisiert hat.

**Tab. 52: Amortisationsdauer für die Investitionen zur Beseitigung der La-Stellen in der Mangelkategorie eingeschränkte Sicht**

Jahr	Baukosten [in EUR]	kalk. Zinsen [in EUR]	Instandhaltungskosten [in EUR]	Kosteneinsparung [in EUR]	Restwert [in EUR]
1	-260.239	-20.819	0	132.993	-148.065
2	0	-20.819	0	132.993	-35.891
3	0	-20.819	0	132.993	76.283

Quelle: Eigene Darstellung

Eine weitere Schwierigkeit liegt in der Definition eines Betrachtungszeitraumes. Eine Baumfällung besitzt keine technische Lebensdauer. Einzig der Zeitraum, bis wieder Baumfällarbeiten notwendig werden, könnte als Zeitspanne angesetzt werden. Da dies nur mittels einer willkürlichen Festlegung eines Zeitraumes möglich wäre, wird in dieser Arbeit darauf verzichtet.

#### **8.4.2.6 Mangelkategorie: Reisendensicherung**

Ähnlich wie in Kapitel 8.4.2.5 ergab sich auch hier die Problematik, dass in der Fachliteratur keine Aussagen über die Behebung dieser Art von Mangel aufzu-



finden war. Es wurden daher die La-Stellen wieder, soweit möglich, einzeln analysiert und bewertet, sowie die entsprechenden Maßnahmen individuell entwickelt.

Alle vier La-Stellen betreffen dabei Bahnhöfe, auf denen die Reisenden ein Gleis mittels eines Reisendenübergangs (RÜ) niveaugleich queren müssen um auf den anderen Bahnsteig gelangen zu können. Nach den Konzernrichtlinien der DB Netz fallen diese Bahnhöfe in eine Gefahrenkategorie, weshalb diese Stationen nur mit 40 km/h befahren werden dürfen, um im Gefahrenfall schnell zum Stehen zu kommen [Vgl. DB Netz 413.0502 2004, Abschnitt 3 (3)]. Als entsprechende Ausbaumaßnahme wird daher die Umgestaltung der einzelnen Bahnhöfe kalkuliert. Dabei werden keine neuen Bahnsteige gebaut, sondern die vorhandenen Bahnsteige mittels niveaufreier Verbindungen miteinander verknüpft. Eine dazu durchgeführte visuelle Analyse der drei Bahnhöfe mit Google Maps ergibt folgendes Bild:

#### Bahnhof Bad Saulgau (La-Stelle 19 & 20)

Der Bahnhof besteht aus zwei Gleisen mit einem Inselbahnsteig sowie einem Seitenbahnsteig, welche durch einen RÜ verbunden sind.

#### Bahnhof Bichl (La-Stelle 72)

Auf Google Maps ist ein veralteter Zustand zu sehen. Weitere Recherchen ergaben, dass der Bahnhof im Jahr 2013 saniert wurde. Es existieren zwei Gleise, ein nicht genutzter Seitenbahnsteig sowie ein Inselbahnsteig. Beide Bahnsteige sind mit einem RÜ verbunden. [Vgl. Pro Bahn 2014]

#### Bahnhof Kochel (La-Stelle 73)

Der Bahnhof weist drei Gleise mit einem Seitenbahnsteig sowie einem Inselbahnsteig auf. Auf Google Maps ist ein RÜ zu erkennen. Das dritte Gleis scheint als Abstellgleis zu dienen. Allerdings ist dieser Bahnhof ein Endbahnhof. Folglich ist die Einfahrtsgeschwindigkeit der Züge nach Behebung der La-Stelle nur unwesentlich höher. In diesem Fall beträgt die Geschwindigkeitsdifferenz 10 km/h (siehe Anhang 9). Es wird daher davon abgesehen, diesen Bahnhof in die Betrachtung miteinzubeziehen.

Die verbleibenden drei La-Stellen weisen einen täglichen Energiemehrbedarf von rund 1.699 kWh auf. Damit belaufen sich die täglichen Mehrkosten durch den Energiemehrbedarf auf gut 219 EUR. Auf ein Jahr bezogen ergibt das 79.935 EUR.

In den Bahnhöfen Bad Saulgau und Bichl wird jeweils eine PU mit je zwei Treppen und zwei Aufzügen erstellt. Die zwei PU führen vom Seitenbahnsteig zum Inselbahnsteig und unterqueren dabei ein Gleis. Nach den in Kapitel 6.1.8 beschriebenen Kostensätzen, ergeben sich bei einer Gesamtaufsichtsfläche der Tunnel von  $2 \times 25 \text{ m}^2$  Gesamtbaukosten von rund 508.500 EUR.<sup>128</sup> Die Baukosten für die insgesamt vier zu installierenden Treppen betragen 745.800 EUR. Für die Herstellung der Barrierefreiheit werden auf jedem Bahnhof zusätzlich zwei Aufzüge installiert. Die Baukosten für die insgesamt vier Aufzüge summieren sich auf 904.000 EUR. Die Gesamtbaukosten für die beiden Bahnhöfe betragen somit ca. 2,158 Mio. EUR. Die kalkulatorischen Zinsen müssen entsprechend mit 172.664 EUR angesetzt werden.

Die Instandhaltungskosten betragen nach Kapitel 6.1.8 für die beiden PU zusammen 1.800 EUR, für die insgesamt vier Treppen 2.640 EUR und für die vier Aufzüge 30.240 EUR. Zusammen ergibt dies Instandhaltungskosten in Höhe von 34.680 EUR.

Die Tab. 53 zeigt auf, dass im 30. Jahr nach der Investition die Kosteneinsparungen nicht zur Amortisation geführt haben. Der Grund ist dabei der gleiche wie bei der Mangelkategorie LST (siehe Kapitel 8.4.2.3). Die Summe aus kalkulatorischen Zinsen sowie den Instandhaltungskosten pro Jahr ist höher als die monetäre Ersparnis durch den verringerten Energiebedarf. Somit können die Investitionskosten niemals eingespart werden. Zudem erschwert die unterschiedliche Lebensdauer der implementierten Maßnahmen eine Amortisation. Während nach Kapitel 6.1.8 die PU eine Lebensdauer von rund 70 Jahren aufweist, ist die technische Lebensdauer von Aufzügen mit 15 Jahren ungleich kürzer. Daher

---

<sup>128</sup> Jede PU ist jeweils rund 10 m lang sowie 2,5 m breit, was eine Aufsichtsfläche von jeweils  $25 \text{ m}^2$  ergibt.  
[Vgl. DB Netz 813.0202 2012, Abschnitt 9 (2)]

müssen innerhalb des betrachteten Zeitraums von Tab. 53 die beiden Aufzüge mindestens einmal erneuert werden.

**Tab. 53: Amortisationsdauer für die Investitionen zur Beseitigung der La-Stellen in der Mangelkategorie Reisendensicherung**

Jahr	Bau-kosten [in EUR]	kalk. Zinsen [in EUR]	Instandhaltungs-kosten [in EUR]	Kosten-einsparung [in EUR]	Restwert [in EUR]
1	-2.158.300	-172.664	0	79.935	-2.251.029
2	0	-172.664	-34.680	79.935	-2.309.078
3	0	-172.664	-34.680	79.935	-2.367.127
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
15	0	-172.664	-34.680	79.935	-3.063.715
16	-904.000	-172.664		79.935	-4.062.828
17	0	-172.664	-34.680	79.935	-4.120.877
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
28	0	-172.664	-34.680	79.935	-4.759.416
29	0	-172.664	-34.680	79.935	-4.817.465
30	0	-172.664	-34.680	79.935	-4.875.514

Quelle: Eigene Darstellung

Werden insgesamt 30 Jahre betrachtet, belaufen sich die Gesamtkosten auf rund 7,3 Mio. EUR. Das Volumen der Ersparnis durch den verringerten Energiebedarf beträgt mit gut 2,4 Mio. EUR nur rund ein Drittel der Gesamtkosten. Folglich belaufen sich die Verluste auf ca. 4,9 Mio. EUR. Das entspricht einem durchschnittlichen jährlichen Verlust von rund 162.000 EUR.

#### **8.4.2.7 Mangelkategorie: Schleppkurve**

Unter den Mangelbegriff der Schleppkurve fallen BÜ, die in Kombination mit einer vor Ort ungünstigen Straßenführung eine Gefährdung des Bahnbetriebes darstellen. Dies kann vorkommen, wenn Kraftfahrzeuge, im speziellen meist

Lastkraftwagen (Lkw), aufgrund einer ungünstigen Verkehrsführung<sup>129</sup> einen BÜ nicht räumen können. Ein Kriterium ist dabei u.a. die Aufstelllänge, die sich vor und hinter dem BÜ befindet. Den gesetzlichen Vorgaben nach muss die Aufstelllänge in der Regel eine Mindestlänge von 25 m sowie eine Mindestbreite von 5,5 m aufweisen<sup>130</sup> [Vgl. DB Netz 815.0020 2008, Abschnitt 1 (2); Vgl. DB Netz 815.0030 2008, Abschnitt 1 (2)].

In dieser Mangelkategorie werden insgesamt elf La-Stellen aufgeführt. Bis auf die La-Stelle Nr. 50 gehören immer zwei La-Stellennummern zur selben La-Stelle. Bei den La-Stellennummern 13/14 ist der Grund für die La-Stelle mittlerweile weggefallen, weshalb diese nicht mehr betrachtet werden [Vgl. Rödermark 2015]. Somit reduziert sich die zu betrachtende Anzahl an La-Stellen auf insgesamt fünf Stück, welche einen Energiemehrbedarf von 2.132 kWh am Tag verursachen. Die dadurch entstehenden täglichen Mehrkosten belaufen sich auf 268 EUR. Auf ein Jahr hochgerechnet ergibt dies 97.739 EUR.

Es existieren aber mehrere Möglichkeiten zur Behebung der La-Stelle, ohne direkt die Straßeninfrastruktur ändern zu müssen. So schlägt Schöne vor, am BÜ vorgelagerte Lichtsignalanlagen (LSA) zu installieren,<sup>131</sup> die eine Räumung des BÜ ermöglichen (siehe Anhang 14). [Vgl. Schöne 2013, S. 674] Eine andere Möglichkeit besteht in der Überwachung des BÜ mittels einer Gefahrenraum-Freimeldeanlage<sup>132</sup>, wie sie die EBO bei BÜ mit Schranken fordert [Vgl. EBO § 11 (16)]. Da es leider nicht möglich war realistische Kostensätze für eine Gefahrenraum-Freimeldeanlage zu ermitteln, verbleibt als alternative Maßnahme die straßenseitige Sicherung des BÜ mit einer LSA.

---

<sup>129</sup> Nach Schöne sind ungünstige Verkehrsführungen gegeben, wenn Fahrzeuge beispielsweise durch die Straßenverkehrsregeln nicht in der Lage sind den BÜ sofort zu räumen. Dies kann beispielsweise durch unmittelbar hinter dem BÜ bestehende Abzweigungen mit Lichtsignalanlagen gegeben sein. [Vgl. Schöne 2013, S. 672 ff.]

<sup>130</sup> Die Länge der Aufstellfläche orientiert sich dabei an der größten im Regelfall zugelassenen Fahrzeuglänge von 20 m sowie einem Ungenauigkeitszuschlag in Höhe von 5 m [Vgl. Schöne 2013, S. 674].

<sup>131</sup> Die LSA muss dabei mit den bahnseitigen Sicherungsanlagen verknüpft werden, so dass sie nur bei einem herannahenden Zug aktiviert wird.

<sup>132</sup> Die Freimeldung des Gefahrenraums erfolgt automatisch z.B. durch Radarscanner. Dies ist das zur Zeit einzige System zur automatisierten Gefahrenraumüberwachung [Vgl. Pelz et al. 2008, S. 12]. Der Radarscanner startet unmittelbar nach dem Schließen der Schranken und scannt den Gefahrenraum in 1 m Höhe auf Hindernisse. Erst wenn der Gefahrenraum frei von Hindernissen ist, gibt die Anlage den BÜ für den Schienenverkehr frei. Der BÜ wird dabei von Überwachungs- oder Hauptsignalen gedeckt, damit Schienenfahrzeuge im Falle einer nicht vorhandenen Freimeldung rechtzeitig anhalten können. [Vgl. Schöne 2013, S. 667 f.; Vgl. Maschek 2013, S. 500]

Für eine klassische LSA an einer T-Kreuzung kann von Baukosten in Höhe von 230.000 EUR ausgegangen werden. Pro Jahr fallen rund 10.000 EUR Instandhaltungskosten an. [Vgl. Sternemann/Laffin 2009, S. 13; Vgl. Sachs 2015] Für die insgesamt fünf La-Stellen ergeben sich somit Gesamtinvestitionskosten von 1,15 Mio. EUR, zuzüglich der jährlichen Instandhaltungskosten von 50.000 EUR und der kalkulatorischen Zinsen in Höhe von 92.000 EUR. Die Tab. 54 zeigt dabei auf, dass eine Amortisation innerhalb der kalkulierten Lebensdauer von 15 Jahren nicht stattfindet [Vgl. Bosserhoff 2007, S. 3].

**Tab. 54: Amortisationsdauer für die Investitionen zur Beseitigung der La-Stellen in der Mangelkategorie Schleppkurve**

Jahr	Investitions- kosten [in EUR]	kalk. Zinsen [in EUR]	Instandhaltungs- kosten [in EUR]	Kosten- einsparung [in EUR]	Restwert [in EUR]
1	-1.299.500	-92.000	-50.000	97.739	-1.293.761
2	0	-92.000	-50.000	97.739	-1.338.022
3	0	-92.000	-50.000	97.739	-1.382.283
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
13	0	-92.000	-50.000	97.739	-1.824.893
14	0	-92.000	-50.000	97.739	-1.869.154
15	0	-92.000	-50.000	97.739	-1.913.415

Quelle: Eigene Darstellung

Im betrachteten Lebensdauerzeitraum entstehen Kosten in Höhe von rund 3,4 Mio. EUR, denen Einsparungen von gut 1,5 Mio. EUR gegenüberstehen. Als Ergebnis liefert dies einen Gesamtverlustbetrag von rund -1,9 Mio. EUR, bzw. rund -128.000 EUR pro Jahr.

#### 8.4.3 Zusammenfassende Bewertung der Engpasskategorie La-Stelle

Abschließend soll für diese Mangelkategorie eine zusammenfassende Bewertung der ermittelten Ergebnisse vorgenommen werden.

### 8.4.3.1 Vergleich der Ausgaben zur Implementierung der infrastrukturellen Maßnahmen versus der Einnahmen durch den reduzierten Energiebedarf

Die Tab. 55 zeigt zusammenfassend alle Investitionen und Ersparnisse für die einzelnen Mangelkategorien auf. Dabei ist zu beachten, dass für jede Mangelkategorie ein separater Betrachtungszeitraum gilt, abhängig von der technischen Lebensdauer einer jeden infrastrukturellen Komponente. Als vergleichender Wert kommt daher allein die durchschnittliche Gesamtersparnis pro Jahr in Betracht.

**Tab. 55: Übersicht Kosteninformationen aller betrachteten La-Stellen<sup>133</sup>**

Mangelkategorie	Gesamtinvestitionskosten [in EUR]	Gesamtersparnis durch verringerten Energiebedarf [in EUR]	Delta von Kosten und Ersparnis [in EUR]	Ø-Gesamtersparnis pro Jahr [in EUR]
Oberbaumangel	-13.374.000	61.389.000	48.015.000	1.200.000
Untergrundmangel	-3.345.000	80.168.000	76.823.000	960.000
Mangel LST	-1.233.000	858.000	-375.000	-15.000
Brückenmangel	22.344.000	109.094.000	86.751.000	964.000
eingeschränkte Sicht <sup>134</sup>	—	—	—	—
Reisenden-sicherung	7.273.000	2.398.000	-4.875.000	-162.000
Schleppkurve	3.380.000	1.466.000	-1.914.000	-128.000
<b>Σ</b>				<b>+2.819.000</b>

Quelle: Eigene Darstellung

Die Tab. 55 zeigt, dass alle Maßnahmen zusammen eine durchschnittliche jährliche Ersparnis von rund 2,8 Mio. Euro ergeben. Die Tabelle zeigt aber auch auf, dass nur die Maßnahmen in den Kategorien Oberbau-, Untergrund- und Brü-

<sup>133</sup> Alle in dieser Tabelle aufgeführten Werte stellen Rundungswerte dar.

<sup>134</sup> Für die Mangelkategorie eingeschränkte Sicht konnte kein Betrachtungszeitraum definiert werden, weshalb für diese Kategorie keine Werte aufgeführt sind (siehe auch Kapitel 8.4.2.5).

ckenmangel Einsparungen pro Jahr erbringen, diese aber sehr groß sind. Die Maßnahmen in den anderen Mangelkategorien erwirtschaften nur Verluste. Dazu ist zu sagen, dass für eine exakte Kostenanalyse neben den lokalen topografischen Gegebenheiten auch die real existierenden Betriebsprogramme von Belang sind. Angaben zu beidem standen dieser Arbeit nicht zur Verfügung. Dennoch können die ermittelten Werte als grobe Richtwerte verstanden werden, die im Ansatz eine Aussage zu möglichen Kosten und Kosteneinsparungen wiedergeben.

Die Aussagen der Kapitel 8.4.2.1 bis 8.4.2.7 zeigen auf, dass es trotz teilweise sehr hoher Investitionsvolumina, durchaus zu einer schnellen Amortisierung der Investitionskosten kommen kann. Dies zeigt besonders die Betrachtung der La-Stellen mit einem Oberbaumangel, da diese ein besonders hohes Einsparpotential aufweisen. Das Einsparpotential basiert dabei nicht auf einer hohen Anzahl an täglichen Zügen<sup>135</sup>, sondern vor allem an der hohen Geschwindigkeitsdifferenz zwischen der Streckengeschwindigkeit und der zu fahrenden Geschwindigkeit in der La-Stelle.<sup>136</sup> Dies wirkt sich vor allem dann sehr negativ aus, wenn die Strecke von Zügen der Kategorie SGV befahren wird. Daher sollten vor allem die La-Stellen mit Oberbaumangel beseitigt werden, auf denen Güterverkehr stattfindet.

Ein zweiter und erwarteter Faktor für die Amortisationsdauer liegt in dem Einfluss der Zugzahlen, die eine La-Stelle passieren. Dies zeigt die Betrachtung der La-Stellen für die Mangelkategorie Untergrundmangel. Dort amortisierten sich die Investitionen schon im ersten Jahr. Daher sollten neben den La-Stellen mit Güterzugverkehren auch jene mit hoher Priorität angegangen werden, die eine deutlich höhere Zugzahl von über hundert Zügen am Tag aufweisen. Sind die Zugzahlen nicht gegeben, kann sich eine Investition unter Umständen niemals amortisieren, wie es sich bei der Analyse der La-Stellen mit einem eingeschränkten BÜ dargestellt hat. Durch das dort sehr geringe Verkehrsaufkom-

---

<sup>135</sup> Keine La-Stelle in der Kategorie „Oberbaumangel“ weist eine höhere Belastung als 54 Züge pro Tag auf.

<sup>136</sup> Die höchste Geschwindigkeitsdifferenz beträgt in dieser Mangelkategorie 90 km/h, die durchschnittliche Geschwindigkeitsdifferenz rund 40 km/h.

men<sup>137</sup> waren die Kosten für Investition und Instandhaltung stets höher als die Einsparungen durch den verringerten Energiebedarf. Ein ähnliches Ergebnis zeigt sich bei der Mangelkategorie Reisendensicherung. Auch hier können die enorm hohen Kosten nicht durch reine Energieeinsparungen ausgeglichen werden. Es ist daher nicht zu empfehlen, solche La-Stellen mit hoher Priorität zu beheben.

#### **8.4.3.2 Bewertung der Fahrzeitgewinne und Streckenkapazität**

Es wurde neben den rein monetären Werten für die Energieeinsparung und die Erstellung der infrastrukturellen Maßnahmen auch die Zeitersparnis, die sich nach der Beseitigung der La-Stelle einstellt, erfasst. Die Zeitersparnis kann nochmals differenziert betrachtet werden. In dieser Arbeit wurden bekanntlich sowohl offizielle deklarierte La-Stellen als auch in den Jahresfahrplan 2014 eingepflegte La-Stellen untersucht. Es müsste daher nochmals unterschieden werden in:

- sich verschlechternde Pünktlichkeit aufgrund der durch die offiziellen La-Stellen entstehende Verspätung
- potentielle Fahrzeitverbesserung auf den Strecken mit bereits eingepflegten La-Stellen

In der Bewertung zur Erbringung einer Transportleistung wirken sich die offiziellen La-Stellen „negativer“ aus, da diese tatsächlich Verspätungen verursachen. Im Kern aber spielt es in dieser Arbeit keine Rolle, ob eine Verspätung aufgebaut wird oder Fahrzeiten durch die Beseitigung von eingepflegten La-Stellen verkürzt werden können.

Die Gesamtverspätung aller offiziellen La-Stellen beträgt pro Tag 2.779 Minuten, die potentielle Fahrzeitverkürzung der in den Jahresfahrplan 2014 eingepflegten La-Stellen beläuft sich auf 889 Minuten (siehe Anhang 11). Es werden aber nur die La-Stellen berücksichtigt, die auch bei der Bewertung der infrastrukturalen

---

<sup>137</sup> Die drei betroffenen La-Stellen werden von insgesamt 72 Zügen am Tag befahren.



rellen Maßnahmen betrachtet wurden. Somit ergibt sich eine Gesamtverspätung von 3.108 Minuten (siehe Tab. 56).

**Tab. 56: Gesamtzeitersparnis für jede Mangelkategorie**

Mangelkategorie	Zeitersparnis je Zugkategorie			Gesamtzeitersparnis [in min]
	SPFV [in min]	SPNV [in min]	SGV [in min]	
Oberbaumangel	0,00	160,71	1.136,01	1.296,72
Untergrundmangel	37,69	141,61	320,87	500,17
Mangel LST	20,06	152,75	373,95	546,76
Brückenmangel	17,75	104,81	174,20	296,76
eingeschränkte Sicht	0,00	208,43	0,00	208,43
Reisendensicherung	0,00	75,35	0,00	75,35
Schleppkurve	0,00	183,81	0,00	183,81
<b><math>\Sigma</math></b>	<b>75,50</b>	<b>1.027,47</b>	<b>2.005,03</b>	<b>3.108,00</b>

Quelle: Eigene Darstellung

Bei einer bestehenden La-Stelle verlängert sich die Sperrzeit eines Blocks um die verlängerte Fahrzeit eines Zuges, die die La-Stelle verursacht. Dies wirkt sich negativ auf die Streckenkapazität aus (siehe Kapitel 5.1.1). Folglich lässt sich durch die Behebung der La-Stellen die Streckenkapazität erhöhen. Eine genaue Betrachtung der Kapazitätserhöhung ist nur für jede einzelne La-Stelle individuell möglich und würde den Rahmen dieser Arbeit überschreiten. Die Thematik der Streckenkapazität hat für die La-Stellen aufgrund ihrer meist niedrigen Zugzahlen nur eine geringe Relevanz.

## 8.5 Engpasskategorie: Eingleisige Strecken

Die Analyse der Engpässe auf eingleisigen Strecken erfolgt in vielen Teilen ähnlich den bisher behandelten Engpässen. Zu Beginn steht wieder die Ermittlung der Zughalte, welche es zu vermeiden gilt, und daran anschließend die Ermittlung von Energieverbrauch und Kosten dieser Halte. Es folgt die Umsetzung von passenden Infrastrukturmaßnahmen und abschließend eine Einschätzung der

gefundenen Ergebnisse. In die Untersuchung wurden nur Engpässe ab 15 km Länge aufgenommen. Ein Ausbau der kürzeren Engpässe mit Begegnungsstellen schien nicht sinnvoll zu sein, wenn diese schon fast die Hälfte des gesamten Engpasses ausmachen würden.

### **8.5.1 Ermittlung der Güterzughalte**

Für die Berechnung der Güterzughalte der eingleisigen Strecke wurden diverse Annahmen getroffen:

Für jeden eingleisigen Engpass wird die Anzahl der Güterzughalte abhängig von der Länge der Strecke konstruiert. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Güterzüge bei Kreuzungen mit Personenzügen nicht halten müssen (siehe Kapitel 7.6.4). Bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h kommt einem Güterzug alle 50 km ein Güterzug entgegen. Um der Tatsache Rechnung zu tragen, dass nicht jeder Güterzug 100 km/h fahren darf und nicht jeder Triebfahrzeugführer immer exakt 100 km/h fährt, wird dieser Wert auf 40 km gesenkt. Dabei ist zu beachten, dass immer nur einer der beiden Güterzüge tatsächlich anhalten muss. Auf einer Strecke von 40 km Länge gibt es also pro zwei Züge eine Zugkreuzung mit dem Halt eines Zuges. Dies wird analog zum festen Wert für Überholungen auf der zweigleisigen Strecke mit der Länge der Strecke verrechnet.

Nach dem Ausbau können die Güterzüge die eingleisigen Strecken ohne Halte durchfahren. Die Fahrpläne sind so optimiert, dass die Kreuzungen der entgegenkommenden Güterzüge immer auf den Begegnungsabschnitten stattfinden. Für abgeschlossene Bereiche wie den Untersuchungsraum dieser Arbeit lässt sich ein solcher Fahrplan leicht konstruieren. In der Realität gäbe es mit Sicherheit noch einzelne Halte, da aber hierüber nur durch eine detaillierte Untersuchung der jeweiligen Strecke eine Aussage getroffen werden kann, bleibt es für diese Arbeit bei obiger Annahme.

Das Ergebnis findet sich gemeinsam mit der Energieberechnung im nächsten Abschnitt.

### 8.5.2 Ergebnisberechnung Energieverbrauch

Im Gegensatz zu den Engpässen auf zweigleisigen Kanten, die bereits jetzt aufgrund des hohen Anteils an Mischverkehr eine hohe Anzahl an Güterzugüberholungen haben, werden die eingleisigen Strecken aus Kapazitätsgründen bisher wenig für Güterverkehr genutzt. Beispiel hierfür ist die eingleisige Strecke zwischen Münster und Lünen, wo momentan nur Personenzüge verkehren [Vgl. Birn/Mann 2010, S. 9-197]. Sämtlichen Strecken wurde das Betriebsprogramm 5 zugeordnet, welches aus einer stündlichen Regionalzugverbindung und einem stündlichen Güterzugpaar besteht (siehe Kap. 7.6.4). Dies ermöglicht eine einfache Vergleichbarkeit zwischen den einzelnen Engpassstellen.

Die Energieverbrauchsberechnung basiert auf dem in Kapitel 8.1.1 erstellten Berechnungsverfahren und wurde per Tabellenkalkulation für alle eingleisigen Engpässe durchgeführt.

**Tab. 57: Auswertung eingleisige Strecken Energie + Kosten**

Id. Nr.	Streckenr.	Streckenabschnitt	Länge [km]	Betriebsprogramm	Kreuzungen pro Tag	Kreuzungen p.a.	Energieverbrauch p.a. [kWh]	Kosten p.a. [EUR]
2	1043	Neumünster - Bad Oldesloe	44,9	5	20	7.375	1.516.652	194.015
3	1960	Langwedel - Uelzen	97,4	5	44	15.998	3.289.953	420.863
4	1745	Verden (Aller) - Rotenburg (Wümme)	27,1	5	12	4.451	915.338	117.093
5	1741	Nienburg (Weser) - Minden (Westf)	52	5	23	8.541	1.756.438	224.690
9	6107	Oebisfelde - Stendal - Wustermark	141	5	63	23.159	4.762.597	609.249
11	6207	Knappenrode - Horka - Grenze D/PL	53	5	24	8.705	1.790.164	229.004
23	2000	Münster - Lünen	42,1	5	19	6.915	1.422.054	181.914
25	6142	Lübbenau - Cottbus	29,6	5	13	4.862	999.859	127.905
27	1520	Oldenburg - Leer	55	5	25	9.034	1.857.822	237.659
28	1122	Lübeck - Bad Kleinen	59,3	5	27	9.740	2.003.698	256.232
30	5600	Markt Schwaben - Freilassing	110	5	50	18.068	3.715.644	475.319
31	1820	Löhne - Elze	82	5	37	13.469	2.769.870	254.332
32	1956	Weddel - Wolfsburg	21	5	9	3.449	709.279	90.733
<b>Summe</b>			<b>814</b>		<b>366</b>	<b>133.765</b>	<b>27.509.368</b>	<b>3.419.008</b>

Quelle: Eigene Darstellung

Insgesamt wurden 13 eingleisige Strecken mit einer Gesamtlänge von 814 km ausgewertet und zusammenfassend in Tab. 57 dargestellt. Im Schnitt kommt es auf jeder Strecke unter den getroffenen Annahmen zu ca. 10.000 Halten pro Jahr durch Güterzugkreuzungen, wobei die Strecke von Oebisfelde nach Wustermark

aufgrund ihrer Länge deutlich herausragt. In der Gesamtbetrachtung können pro Jahr auf allen eingleisigen Engpässen ca. 27,5 Mio. kWh mit Kosten von knapp 3,5 Mio. EUR eingespart werden.

### **8.5.3 Implementierung der Maßnahmen**

Gemäß der Annahme aus Kap. 8.5.1, dass sich Güterzüge auf der eingleisigen Strecke nur alle 40 km begegnen, ist es nicht sinnvoll, jeden Bahnhof zur Begegnungsstelle auszubauen. Je nachdem, wie die Kreuzungsbahnhöfe auf der Strecke verteilt sind, kann es auch sinnvoll sein, eine Begegnungsstelle zwischen zwei Bahnhöfen neu anzulegen. Wichtig ist nur, dass diese Ausbauten etwa im Abstand der Güterzugkreuzungen liegen. Dass dies auch hohe Anforderungen an die Fahrplankonstruktion stellt, die nicht immer erfüllt werden können, wurde bereits beschrieben.

Die Ausbaumaßnahmen, welche zur Behebung des Engpasses gewählt werden, stimmen nicht notwendigerweise mit den Maßnahmen überein, welche im BVWP oder eine der anderen Quellen genannt werden. Zunächst geht es nur um die Funktionsweise des Modells, eine spätere Anpassung an tatsächlich bestehende Planungen ist problemlos möglich. Bei den eingleisigen Strecken hat dies den Hintergrund, dass die entwickelte Maßnahme der Begegnungsstellen in dieser Weise nirgends konkret in Planung ist. Es gibt zwar Planungen für teilweise zweigleisigen Ausbau, dieser ist aber viel großräumiger als die hier untersuchten Begegnungsstellen. In vielen Fällen ist ein zweigleisiger Ausbau vorgesehen, der hauptsächlich der Vergrößerung der Streckenkapazität dienen soll.

### **8.5.4 Beispiel Langwedel – Uelzen (Strecke 1960)**

Die eingleisige Strecke Langwedel – Uelzen ist im Rahmen der Bundesverkehrswegeplanung als Maßnahme des vordringlichen Bedarfes aufgenommen worden [Vgl. BMVBW 2003, S. 55]. Die Bedarfsplanüberprüfung 2010 ergab allerdings nur ein Nutzen-Kosten-Verhältnis von 0,5 [Vgl. Birn/Mann 2010, S. 10-25]. Eine Realisierung der geprüften Maßnahme, bestehend aus der Elektrifizierung und einer Ertüchtigung für 120 km/h [Vgl. Birn/Mann 2010,

S. 10-18], scheint damit nicht sehr wahrscheinlich. Trotzdem eignet sie sich aufgrund ihrer Länge gut, die Funktionsweise der Modellierung für eingleisige Strecken zu demonstrieren.

Mithilfe des Eisenbahnatlas [Vgl. Schweers 2014, S. 48] und Google Maps wurden die notwendigen Infrastrukturelemente und ihre Anzahl bzw. Länge bestimmt. Die Strecke ist ca. 98 km lang, es sind also 2 Begegnungsstellen notwendig. Die erste soll in Emmingen bei Streckenkilometer 41,4, die zweite in Bendingbostel bei Streckenkilometer 79,1 liegen. Gemäß den Ergebnissen aus Kapitel 7.6.5 werden die Begegnungsstellen mit einer Länge von 3.500 m geplant. Zusätzlich wurden die Elektrifizierung und die Streckenertüchtigung für 120 km/h berücksichtigt. Die Ertüchtigung wurde mit 50 % der Neubaukosten eingerechnet. Die Knoten Uelzen und Langwedel wurden nicht betrachtet, stattdessen wurde davon ausgegangen, dass die zeitlich passenden Abfahrten für die Güterzüge im Hinblick auf die Zugkreuzungen in beiden Betriebsstellen möglich sind. Die Infrastrukturkosten für diese Beispielstrecke sind in Tab. 58 zusammengestellt.

**Tab. 58: Infrastrukturkosten Langwedel – Uelzen**

Infrastrukturelement	Anzahl / Länge	Baukosten + kalk. Zinsen [ Mio. EUR]	Instandhaltungskosten p.a. [ Mio. EUR]	Gesamtkosten <sup>138</sup> [Mio. EUR]
Oberbau + Gleisbau (neu)	7 km	8,99	0,06	10,56
Oberbau + Gleisbau (Ertüchtigung)	97,4 km	61,64	0,43	72,45
Brücken (alle)	5	1,69	0,05	2,94
Weichen	4	0,9	0,01	1,27
Signale	12	6,1	0,03	7,0
Elektrifizierung	97,4 km	25,69	0,18	30,17
<b>Σ</b>		<b>105,0</b>	<b>0,76</b>	<b>124,39</b>

Quelle: Eigene Darstellung

<sup>138</sup> Baukosten + kalk. Zinsen + Instandhaltungskosten für 25 Jahre

### 8.5.5 Einschätzung der Ergebnisse

Wie in den bisher durchgeführten Auswertungen wird auch für die eingleisigen Strecken ein Vergleich von Infrastrukturausbaukosten und Energieeinsparungen durchgeführt. Es wird davon ausgegangen, dass pro Stunde je ein Zugpaar des SPNV und des SGV die Strecke befährt. Ein Ausbau mit Begegnungsabschnitten bei unverändertem Betriebsprogramm vermeidet die in Kapitel 8.5.2 ermittelte Anzahl an Güterzughalten.

**Tab. 59: Kostenvergleich Beispielstrecke Langwedel – Uelzen**

Gesamtkosten 25 Jahre	Energie- einsparung 25 Jahre	Instandhaltungs- kosten p.a.	Energie- einsparung p.a.
[Mio. EUR]	[Mio. EUR]	[Mio. EUR]	[Mio. EUR]
124,39	10,5	0,76	0,423

Quelle: Eigene Darstellung

In einem Zeitraum von 25 Jahren erbringt diese Ausbaumaßnahme eine Einsparung von Energiekosten in Höhe von 10,5 Mio. EUR, also 8,5 % der Gesamtkosten im selben Zeitraum (siehe Tab. 59).

Im Hinblick auf die Kapazität der Strecke ergibt sich keine Verbesserung, da die Begegnungsstellen nur so kurz dimensioniert sind, dass sie Zugkreuzungen ohne Halte ermöglichen. Dies gilt aber nur, wenn die Begegnungsstellen bereits existierende Kreuzungsbahnhöfe ersetzen. Jede zusätzliche Kreuzungsmöglichkeit erhöht tendenziell die Kapazität einer Strecke [Vgl. Eickmann et al. 2008, S. 31-35]. Die Pufferzeiten der Kreuzung sind abhängig von der Länge des Begegnungsabschnittes [Vgl. Pachl 2013a, S. 203]. Im vorliegenden Fall wird von einer Pufferzeit von 60 s ausgegangen, was für eine eingleisige Strecke gering ist [Vgl. Pachl 2013a, S. 208] und schon bei kleinen Störungen zur Verspätungsübertragung auf den Gegenzug führen kann. Dies führt zum Verlust des Vorteils der Begegnungsstelle, da einer von beiden Zügen dann halten muss. Eine wirklich leistungsfähige Güterverkehrsroute ergibt sich nur durch einen durchgängigen zweigleisigen Ausbau. Im letzteren Fall steigt die Kapazität der Strecke stark an, mit ihr aber auch die Infrastrukturkosten. Das Problem der Zugkreu-

zungen besteht dann nicht mehr, an seine Stelle tritt dann aber die Thematik der Zugüberholungen. Sollten jedoch alle Züge ähnliche Durchschnittsgeschwindigkeiten haben, lassen sich Überholungen auf ein Minimum reduzieren oder sogar ganz vermeiden.

## 8.6 Kritische Würdigung

Die Ausführung des Modells wird in diesem Kapitel kurz bewertet. Insbesondere sollen die Aspekte zur Sprache kommen, die keinen weiteren Eingang in die Arbeit gefunden haben.

### 8.6.1 Nutzenkomponenten

Die Bewertung stützt sich hauptsächlich auf das Verhältnis von Kosten durch Infrastrukturausbau und den Nutzen durch die Einsparung an Traktionsenergie. Andere Nutzenkomponenten konnten im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet werden. Um die Wirtschaftlichkeit eines Ausbauprojektes zu beurteilen, ist aber eine Betrachtung aller Aspekte notwendig. Dazu gehören unter anderem:

Einer der wichtigsten Indikatoren für den Nutzen eines Infrastrukturausbaus ist die Erhöhung der Leistungsfähigkeit. Es gibt bereits eine große Anzahl an Publikationen, die sich detailliert mit diesem Thema befassen.<sup>139</sup> Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Auswirkungen des Infrastrukturausbaus auf die Kapazität der Strecken nicht im Einzelnen berechnet, sondern eine qualitative Einschätzung vorgenommen. Eine Gesamtbetrachtung des Infrastrukturausbaus muss diesem Aspekt einen größeren Stellenwert einräumen.

Auswirkungen auf die Fahrzeit der Güterzüge: Es wurde zwar eine Anzahl der Überholungen ermittelt, dadurch lässt sich aber noch keine Aussage über die Zeit treffen, die ein Güterzug im Überholbahnhof abwarten muss, bis er weiterfahren darf. Dies ist stark von der aktuellen Betriebssituation abhängig. Der BVWP berücksichtigt diesen Aspekt unter anderem durch eine Berücksichti-

---

<sup>139</sup> Siehe u.a. Gille 2014, Wendler 1995, Wendler 2011, Janecek et al. 2012 und Weigand 2012.

gung der Fahrzeugvorhaltungs- und der Fahrzeugbetriebskosten [Vgl. BMVBW 2005, S. 125 f.]. Daneben gibt es noch eine Nutzenkomponente für verkürzte Transport- bzw. Reisezeiten. Diese kann möglicherweise zu räumlichen Verkehrsverlagerungen, zu einem Wechsel des Verkehrsträgers oder zur Induktion neuer Verkehre führen [Vgl. BMVBW 2005, S. 119]. Eine derartig aufwändige Untersuchung solcher Netzeffekte war im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich.

Auswirkungen auf die Verspätungsanfälligkeit einer Strecke: Eine zu hohe Belastung einer Strecke führt zu einer geringeren Stabilität des Fahrplans und zu höheren Verspätungswahrscheinlichkeiten. Eine Entmischung der Verkehre unterschiedlicher Geschwindigkeiten, wie dies durch einen Ausbau mit zusätzlichen Gleisen möglich ist, führt ebenfalls zu einer höheren Stabilität des Betriebs. [Vgl. Pahl 2013a, S. 130 f.]

Mit den Energieeinsparungen sind positive Umwelteffekte wie verminderte Emissionen verbunden, die beispielsweise analog zur standardisierten Bewertung des ÖPNV<sup>140</sup> einbezogen werden können. Evtl. sind auch Lärminderungen einzubeziehen, da besonders Güterzüge durch ihre noch immer eingesetzten Graugussklotzbremsen eine hohe Lärmbelastung verursachen.

Negative Umwelteffekte entstehen besonders aus dem Bau der Infrastruktur. Der BVWP bewertet dies im Rahmen einer Analyse der Umweltrisiken [Vgl. BMVBW 2005, S. 44].

Bremsvorgänge bei der Eisenbahn sind in den meisten Fällen verschleißbehaftet, wodurch ein Nutzen durch „eingesparte“ Bremsvorgänge entsteht. Zum einen gilt dies auf der Fahrzeugseite, zum anderen wird auch die Infrastruktur durch Bremsvorgänge belastet, da sie die Bremsenergie aufnehmen muss [Vgl. Gerber 2013, S. 45 f.]. Daneben gibt es noch den Aspekt der Anhängigkeit des Energieverbrauchs zum Zustand der Infrastruktur. Eine bessere Instandhaltung äußert sich sowohl in mehr Fahrkomfort als auch in einem geringeren Energieverbrauch [Vgl. Horvát/Kiss 2006, S. 804 f.]. Genaue Zahlen zu den As-

---

<sup>140</sup> Siehe BMVBS 2006



pekten liegen jedoch nicht vor, sodass eine Einbeziehung in die Bewertung nicht möglich ist.

### **8.6.2 Infrastrukturfinanzierung**

Innerhalb der vorliegenden Arbeit wurden sämtliche Kosten und Nutzen so berechnet, als wären sie einem Unternehmen zuzurechnen. Dies trifft so selbstverständlich nicht zu. Betrachtet wird im Weiteren die Konstellation, wie sie für die Eisenbahnen des Bundes gilt. Kostenträger im Bereich Infrastrukturausbau ist bei allen Projekten, die Teil des BVWP sind, der Bund, bei Ausbauprojekten, die nur den Nahverkehr betreffen, die jeweiligen Bundesländer [Vgl. BMVBW 2003, S. 1-5]. Bei Ersatzinvestitionen sind der Bund und die DB Netz gemeinsam beteiligt, wobei der Anteil der DB Netz deutlich kleiner ist. Instandhaltungsaufwendungen muss die DB Netz selbst tragen, sie ist durch die sogenannte Leistungs- und Finanzierungsvereinbarung verpflichtet, bestimmte Mindestsummen in die Instandhaltung zu investieren. [Vgl. DB 2014d, S. 7 f.] Der letzte Punkt trifft besonders auf die La-Stellen zu. Die Ausbaumaßnahmen der Kanten, Knoten und eingleisigen Strecken liegen wegen ihrer großen Bedeutung für Fern- und Güterverkehr fast alle im Bereich des BVWP, aus dem ein großer Teil der Engpässe auch stammt (siehe Kapitel 5.2.3).

Der Nutzen aus den Energieeinsparungen liegt dagegen ausschließlich bei den EVU, welche auf den ausgebauten Strecken Züge betreiben. Insbesondere im Bereich der La-Stellen kann dies zu einem Interessenkonflikt zwischen den EVU und der DB Netz, die für die Vorhaltung der Schienenwege in einem angemessenen Zustand verantwortlich ist, führen [Vgl. DB 2014d, S. 7]. Die Übernahme von La-Stellen in den Fahrplan ist dabei ein besonders strittiger Punkt. Für die Betrachtung der Projekte des BVWP ist dies nicht von entscheidender Relevanz, da sie immer auf gesamtwirtschaftlicher Basis erfolgt, d.h. die Nutzen für die EVU werden in die Bewertung aufgenommen [Vgl. BMVBW 2005, S. 33]. Wo der Nutzen entsteht, spielt im BVWP nur eine untergeordnete Rolle.

### 8.6.3 Bewertungsmodell

Unabhängig davon, von wem der Ausbau finanziert wird, wäre für die vorgestellten Modelle eine möglichst umfassende gesamtwirtschaftliche Bewertung notwendig. Da sowohl Kosten als auch Nutzen von Eisenbahnausbaumaßnahmen aus sehr vielen Einzelkomponenten bestehen, wurde auf die Entwicklung eines solchen Modells verzichtet. Zu viele Bestandteile waren nicht oder nur zu ungenau zu ermitteln. Der Fokus wurde klar auf die eisenbahntechnischen Aspekte gelegt, wodurch die Bewertung deutlich kürzer gefasst wurde und sich hauptsächlich auf die Effekte durch Energieeinsparungen konzentriert.

Eine vergleichende Bewertung zwischen den einzelnen Ausbaumaßnahmen wurde nicht durchgeführt, da es bei den meisten Engpassstellen nur eine sinnvolle Lösung gab. Wenn es Alternativen gab, dann meist nur in der Anzahl der neu zu bauenden Gleise. Dies findet sich auch in der Ausbaukonzeption des BVWP. Bei einem zweigleisigen Engpass besteht die Lösung meist aus einer zweigleisigen Neubaustrecke, bei eingleisigen Engpässen nahezu immer aus dem Bau eines zweiten Gleises inkl. Elektrifizierung.

## 9 Zusammenfassung

Entsprechend der Themenstellung ist die Frage nach den Zusammenhängen von Infrastrukturgestaltung und Energieverbrauch zu beantworten. Der Einfluss des Infrastrukturausbaus ist klar zu sehen, er unterscheidet sich aber deutlich je nach Art des untersuchten Engpasses. Überall dort, wo Behinderungen des Betriebs verschiedenster Art beseitigt oder verringert werden, lässt sich ein Rückgang des Energieverbrauchs feststellen. Ebenso bringt eine Beseitigung der Streckenwiderstände wie Bögen oder Neigungen weniger Energieverbrauch mit sich, auch wenn diese Aspekte nur theoretisch betrachtet wurden.

**Tab. 60: Verhältnis Energieeinsparung / Gesamtkosten**

Engpassart	Anteil der Energieeinsparung an den Gesamtkosten des Ausbaus
Kanten	3,5 %
Knoten	15 %
Eingleisigkeit	8,5 %

Quelle: Eigene Darstellung

Tab. 60 stellt die Zusammenhänge zwischen Gesamtkosten des Ausbaus und den dadurch möglichen Energieeinsparungen dar. Dabei zeigt sich, dass örtlich begrenzte Ausbaumaßnahmen, wie sie in Knoten angewandt werden, den höchsten Anteil an Einsparungen haben. Ausbauten der Strecken haben deutlich höhere Kosten, besonders beim Neubau von Gleisen, wodurch der Anteil der Energieeinsparung sinkt. Diese Werte wurden an jeweils einem Beispiel berechnet, sodass sich keine allgemeingültige Aussage treffen lässt. Eine Gesamtauswertung aller Engpässe hätte aufgrund des großen Aufwands der Kosten-

schätzung von Ausbaumaßnahmen den Rahmen der Arbeit überschritten. Die Vorteile des Ausbaus von bereits zweigleisigen Strecken mit zusätzlichen Gleisen liegen neben der Kapazitätserhöhung hauptsächlich in der dann möglichen Entmischung der Verkehre unterschiedlicher Geschwindigkeiten. Falls die neue Strecke direkt neben der bestehenden gebaut wird, kann durch Überleitstellen die betriebliche Flexibilität erhöht werden.

Über die Beseitigung von La-Stellen lässt sich keine generelle Aussage treffen. Im Gegensatz zu den übrigen Engpasskategorien gibt es jedoch einige La-Stellen, deren Energieeinsparung die Gesamtkosten im Laufe der technischen Lebensdauer überschreitet (siehe Tab. 55 in Kapitel 8.4.3.1). Dies hängt zum einen damit zusammen, dass es sich um sehr punktuelle Maßnahmen mit zum Teil nur geringen Kosten handelt, zum anderen sind von La-Stellen immer alle dort verkehrenden Züge betroffen, was das Potential für Energieeinsparungen deutlich erhöht.

Es zeigte sich, dass auf Engpässen mit hohen Zugzahlen in den Kategorien SPFV und SGV die höchsten Einsparpotentiale liegen. Beim SPFV ist die Differenz zwischen der Höchstgeschwindigkeit und der verringerten Geschwindigkeit, welche durch den Engpass vorgegeben wird, am größten. Dies führt zu Beschleunigungsvorgängen im hohen Geschwindigkeitsbereich, welche zu einem hohen Energieverbrauch führen. Beim SGV ist die hohe Masse der ausschlaggebende Faktor. Diese muss infolge häufiger Zughalte durch Überholungen immer wieder beschleunigt werden.

Viele Aspekte der Themenstellung wurden sehr grundsätzlich behandelt und unter dem Aspekt entwickelt, sie leicht an andere Eingangsparameter anpassen zu können, beispielsweise bei der Energieberechnung der Triebfahrzeuge oder der Zusammenstellung der Infrastrukturkosten. Verschiedene Grundlagen der Energieberechnung benötigen aber noch weitere Forschung, so zum Beispiel ein Modell zur Abschätzung der Häufigkeit von Überholungen der Güterzüge durch schnellere Personenzüge. Für die Berechnung des Energiesparpotentials in Kno-

ten ist eine Verbindung des entworfenen Modells mit bestehenden Knotenanalysen notwendig.

Damit ist es mit wenigen Anpassungen möglich, auf Basis dieser Arbeit weiterführende Themen zu behandeln. Eine Integration in eine umfassende Nutzenberechnung für Infrastrukturausbaumaßnahmen kann ohne Weiteres erfolgen.

## Literaturverzeichnis

### **Albrecht et al. 2011**

ALBRECHT, Thomas; BINDER, Anne; GASSEL, Christian: *Energie- und betriebseffiziente Fahrweisen im Eisenbahnverkehr*. In: *Eisenbahningenieur*, Jg. 62 (2011), Nr. 2, S. 39–43

### **Belter et al. 2008**

BELTER, Bringfried; BOHRER, Wolfgang; KUNEFKE, Frank: *Masterpläne für Schieneninfrastruktur der fünf größten deutschen Häfen*. In: *Eisenbahntechnische Rundschau*, Jg. 57 (2008), Nr. 4, S. 178-190

### **Bendfeldt 1999**

BENDFELDT, Jan-Philipp: *Gestaltung und Bewertung von Fahrstraßenknoten*. In: *Der Eisenbahningenieur*, Jg. 50 (1999), Nr. 9, S. 36–39

### **Bendfeldt 2005**

BENDFELDT, Jan-Philipp: *Standardisierung in der Planung von Eisenbahnknoten*. In: *Der Eisenbahningenieur*, Jg. 56 (2005), Nr. 6, S. 18–28

### **Biesenack et al. 2006**

BIESENACK, Hartmut; BRAUN, Erich; GEORGE, Gerhard; GIBERT, Karl-Heinz; HOFMANN, Gerhard; KLINGE, Ralf; PUSCHMANN, Rainer; RÖHLING, Steffen; SCHLECHTER, Ewald; SCHMIEDER, Axel; SCHNEIDER, Egid; STEPHAN, Arnd: *Energieversorgung elektrischer Bahnen*. Wiesbaden : Teubner Verlag, 2006

### **BIHK 2012**

BAYRISCHE INDUSTRIE- UND HANDELSKAMMER E.V. (HRSG.): *Für ein leistungsfähiges Schienennetz : Positionspapier des Bayrischen Industrie- und Handelskammertages BIHK*. München :

URL: <https://www.muenchen.ihk.de/de/presse/Anhaenge/positionspapier-schienenverkehr-bayern-broschuere.pdf>, zuletzt aktualisiert im Oktober 2012, letzter Zugriff am 05.05.2015

### **Birn et al. 2006**

BIRN, Kristian; SCHNEIDER, Walter; MANN, Hans-Ulrich; SCHUBERT, Markus: *Bewertung von Investitionen zum Ausbau deutscher Eisenbahnstrecken im Zulauf zur NEAT*. Freiburg/München : URL: [http://www.bodensee-oberschwaaben.de/upload/Bewertung\\_Ausbau\\_deutscher\\_NEAT\\_Zulaufstrecken\\_Kurzfassung\\_243.pdf](http://www.bodensee-oberschwaaben.de/upload/Bewertung_Ausbau_deutscher_NEAT_Zulaufstrecken_Kurzfassung_243.pdf), zuletzt aktualisiert im Juli 2006, letzter Zugriff am 05.05.2015

**Birn/Mann 2008**

BIRN, Kristina; MANN, Hans-Ulrich: *Prognose der Verkehrsnachfrage und der Zugzahlen auf der Oberrheinstrecke 2025*. Freiburg : ohne Verlag, 2008

**Birn/Mann 2010**

BIRN, Kristina; MANN, Hans-Ulrich: *Überprüfung des Bedarfsplans für die Bundes-schienenwege*. Freiburg : ohne Verlag, Abschlussbericht, 2010

**BMVBS 2006**

BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENTWICKLUNG (HRSG.): *Standardisierte Bewertung von Verkehrsweeinvestitionen des öffentlichen Personennahverkehrs und Folgekostenrechnung*. München : ohne Verlag, 2006

**BMVBW 2003**

BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND WOHNUNGSWESEN (HRSG.): *Bundesverkehrswegeplan 2003*. Bonn : ohne Verlag, 2003

**BMVBW 2005**

BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND WOHNUNGSWESEN (HRSG.): *Bundesverkehrswegeplan 2003 : Die gesamtwirtschaftliche Bewertungsmethodik*. Bonn : ohne Verlag, 2005

**BMVI 2014**

BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR (HRSG.): *Verkehrsinvestitionsbericht für das Berichtsjahr 2012*. Berlin :

URL: [http://www.bmvi.de/DE/VerkehrUndMobilitaet/Verkehrspolitik/Verkehrsinfrastruktur/Verkehrsinvestitionsbericht/verkehrsinvestitionsbericht\\_node.html](http://www.bmvi.de/DE/VerkehrUndMobilitaet/Verkehrspolitik/Verkehrsinfrastruktur/Verkehrsinvestitionsbericht/verkehrsinvestitionsbericht_node.html), zuletzt aktualisiert im Februar 2014, letzter Zugriff am 05.05.2015

**BMVI 2015**

BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR (HRSG.): *Übersicht über die laufenden Vorhaben und die für den Bundesverkehrswegeplan vorgeschlagenen Vorhaben*. ohne Ort. :

URL: [http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/bvwp-uebersicht-vorhaben-schiene.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/bvwp-uebersicht-vorhaben-schiene.pdf?__blob=publicationFile), zuletzt aktualisiert am 09.02.2015, letzter Zugriff am 09.08.2015

**Bremer Baumfällung o.J.**

REINICKE, T.: *Preise für Spezialfällungen*. Bremen : URL: [http://www.bremer-baumfaellung.de/Preise\\_Spezialfaellung.html](http://www.bremer-baumfaellung.de/Preise_Spezialfaellung.html), letzter Zugriff am 03.05.2015

### **Bruckmann/Weidmann 2015**

BRUCKMANN, Dirk; WEIDMANN, Ulrich: *Strategien zur Erhöhung der Energieeffizienz im Schienengüterverkehr*. In: *Eisenbahntechnische Rundschau*, Jg. 64 (2015), Nr. 4, S. 69–73

### **Bundesregierung 2013**

PRESSE- UND INFORMATIONSAMT DER BUNDESREGIERUNG (HRSG.): *Erdwärme hält Weichen schneefrei*. Berlin :

URL: [http://www.bundesregierung.de/Webs/Breg/DE/Themen/Energiewende/Forschung\\_konkret/6\\_waermerohr/\\_node.html](http://www.bundesregierung.de/Webs/Breg/DE/Themen/Energiewende/Forschung_konkret/6_waermerohr/_node.html), zuletzt aktualisiert am 15.08.2013, letzter Zugriff am 26.02.2015

### **Bundestag 2014**

DEUTSCHER BUNDESTAG: *Vorübergehende Langsamfahrstellen im deutschen Schienennetz*. Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Matthias Gastel, Stephan Kühn (Dresden), Dr. Valerie Wilms, Markus Tressel, Oliver Krischer, Peter Meiwald, Friedrich Ostendorff, Dr. Julia Verlinden und der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN – Drucksache 18/2410 –, Berlin :

URL: <https://www.ndr.de/fernsehen/sendungen/panorama3/bahn946.pdf>, zuletzt aktualisiert am 08.10.2014, letzter Zugriff am 19.04.2015

### **Bundestag 2015**

DEUTSCHER BUNDESTAG: *Aktuelle und geplante vorübergehende Langsamfahrstellen im deutschen Schienennetz*. Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Matthias Gastel, Oliver Krischer, Stephan Kühn (Dresden), weiterer Abgeordneter und der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN – Drucksache 18/3877 –, Berlin :

URL: <http://dip21.bundestag.de/dip21/btd/18/040/1804041.pdf>, zuletzt aktualisiert am 19.02.2015, letzter Zugriff am 09.04.2015

### **Bosserhoff 2007**

BOSSERHOFF, Dietmar: *Arbeitsprogramm des Teilprojektes „Qualitätssicherung an Lichtsignalanlagen und Umsetzung“*. Wiesbaden :

URL: [https://mobil.hessen.de/irj/servlet/prt/portal/prtroot/slimp.CMReader/HMWVL\\_15/HSVV\\_Internet/med/020/02050167-190c-d421-0e82-3e18a438ad1b,22222222-2222-2222-2222-222222222222](https://mobil.hessen.de/irj/servlet/prt/portal/prtroot/slimp.CMReader/HMWVL_15/HSVV_Internet/med/020/02050167-190c-d421-0e82-3e18a438ad1b,22222222-2222-2222-2222-222222222222), zuletzt aktualisiert im März 2007, letzter Zugriff am 18.05.2015

### **BVG 2014**

BERLINER VERKEHRSBETRIEBE AÖR (HRSG.): *Immer Saft an der Schiene*. In: *PLUS – Das Kundenmagazin*, 03/2014, S. 14-15



**DB 2005a**

DEUTSCHE BAHN AG (HRSG.): *Umweltbericht 2005 : Download-Version*. Berlin : URL: [http://www.deutschebahn.com/file/de/4337650/NdjbiTT2SXxCXin8bmX\\_\\_ByjDA/2185824/data/umweltbericht2005\\_\\_download-version.pdf](http://www.deutschebahn.com/file/de/4337650/NdjbiTT2SXxCXin8bmX__ByjDA/2185824/data/umweltbericht2005__download-version.pdf), letzter Zugriff am 14.05.2015

**DB 2005b**

DEUTSCHE BAHN AG (HRSG.): *Umweltkennzahlen : Daten und Fakten*. Berlin : ohne Verlag, 2005

**DB 2007**

DEUTSCHE BAHN AG (HRSG.): *Umweltkennzahlen 2006 : Daten und Fakten*. Berlin : ohne Verlag, 2007

**DB 2013**

DEUTSCHE BAHN AG (HRSG.): *Nachhaltigkeitsbericht 2012*. Berlin : ohne Verlag, 2013

**DB 2014a**

DEUTSCHE BAHN AG (HRSG.): *Geschäftsbericht 2013*. Berlin : ohne Verlag, 2014

**DB 2014b**

DEUTSCHE BAHN AG (HRSG.): *Zwischenbericht 2014*. Berlin : ohne Verlag, 2014

**DB 2014c**

DEUTSCHE BAHN AG (HRSG.): *Masterplan Schiene : Seehafen-Hinterland-Verkehr*. Berlin : URL: <http://www.hamburg-fuer-die-elbe.de/wordpress/wp-content/uploads/2014/05/Deutsche-Bahn-Masterplan-Seehafenhinterlandverkehr.pdf>, zuletzt aktualisiert am 01.10.2007, letzter Zugriff am 05.05.2015

**DB 2014d**

DEUTSCHE BAHN AG (HRSG.): *Infrastrukturzustands- und -Entwicklungsbericht 2013*. ohne Ort : URL: [http://www.eba.bund.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Finanzierung/IZB/IZB\\_2013.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=7](http://www.eba.bund.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Finanzierung/IZB/IZB_2013.pdf?__blob=publicationFile&v=7), letzter Zugriff am 09.08.2015

**DB 2015a**

DEUTSCHE BAHN AG (HRSG.): *Wintervorbereitung : Bahn steckt mehr als 70 Millionen Euro in die Wintervorbereitung*. Berlin : URL: [http://www.deutschebahn.com/de/konzern/im\\_blickpunkt/8459904/20141112\\_wintervorbereitungen.html](http://www.deutschebahn.com/de/konzern/im_blickpunkt/8459904/20141112_wintervorbereitungen.html), letzte Aktualisierung am 13.01.2015, letzter Zugriff am 26.02.2015

### **DB 2015b**

DEUTSCHE BAHN AG (HRSG.): *Intelligente Energienutzung : DB spart Energie durch Bremsenergieerückspeisung und umsichtige Fahrweise*. Frankfurt am Main : URL: [http://www.deutschebahn.com/de/nachhaltigkeit/oekologie/klimaschutz/energie\\_einsparen.html](http://www.deutschebahn.com/de/nachhaltigkeit/oekologie/klimaschutz/energie_einsparen.html), zuletzt aktualisiert am 18.03.2015, letzter Zugriff am 12.05.2015

### **DB 2015c**

Deutsche Bahn AG (Hrsg.): *Bahnübergänge in Bayern*. München : URL: [http://www.deutschebahn.com/presse/muenchen/de/hintergrund/themendienst/8960988/01-2015\\_Themendienst\\_Bahnuebergaenge.html](http://www.deutschebahn.com/presse/muenchen/de/hintergrund/themendienst/8960988/01-2015_Themendienst_Bahnuebergaenge.html), zuletzt aktualisiert am 24.02.2015, letzter Zugriff am 15.05.2015

### **DB Energie 2010**

DB ENERGIE GMBH (HRSG.): *DB Energie 16,7 Hz-Bahnstrom/Gleichstrom : volle Zugkraft rund um die Uhr*. Frankfurt am Main : URL: [https://www.dbenergie.de/file/dbenergie-de/2546908/LGPDtngLbiFjWXGhqqu9JFYThRU/2542428/data/bahnstrom\\_informationsbroschuere.pdf](https://www.dbenergie.de/file/dbenergie-de/2546908/LGPDtngLbiFjWXGhqqu9JFYThRU/2542428/data/bahnstrom_informationsbroschuere.pdf), zuletzt aktualisiert August 2010, letzter Zugriff am 19.04.2015

### **DB Energie 2014a**

DB ENERGIE GMBH (HRSG.): *Unsere Innovationen*. Frankfurt am Main : URL: [http://www.db-energie.de/dbenergie-de/ueber\\_dbenergie/nachhaltigkeit/innovationen.html?hl=110%20kV](http://www.db-energie.de/dbenergie-de/ueber_dbenergie/nachhaltigkeit/innovationen.html?hl=110%20kV), letzter Zugriff am 20.02.2015

### **DB Energie 2014b**

DB ENERGIE GMBH (HRSG.): *Kennzeichnung der Stromlieferung 2013*. Frankfurt am Main : URL: [http://www.dbenergie.de/file/2546498/data/allgemeines\\_stromkennzeichnung.pdf](http://www.dbenergie.de/file/2546498/data/allgemeines_stromkennzeichnung.pdf), letzter Zugriff am 08.02.2015

### **DB Energie 2015a**

DB ENERGIE GMBH (HRSG.): *16,7-Hz-Bahnstrom / Gleichstrom: Volle Zugkraft rund um die Uhr*. Frankfurt am Main : URL: [http://www.dbnetze.com/infrastruktur-de/start/produkte/energie/167\\_hz.html](http://www.dbnetze.com/infrastruktur-de/start/produkte/energie/167_hz.html), zuletzt aktualisiert am 13.01.2015, letzter Zugriff am 19.04.2015

### **DB Energie 2015b**

DB ENERGIE GMBH (HRSG.): *Bahnstrompreisregelung ab 01.01.2015 – Produkt „Comfort“*. Frankfurt am Main : URL: [https://www.dbenergie.de/file/dbenergie-de/2546908/Rexyqml9c05ttofNGObMXKdku0s/8642542/data/Neuer\\_Inhalt.pdf](https://www.dbenergie.de/file/dbenergie-de/2546908/Rexyqml9c05ttofNGObMXKdku0s/8642542/data/Neuer_Inhalt.pdf), zuletzt aktualisiert am 29.09.2014, letzter Zugriff am 19.04.2015

**DB Energie 2015c**

DB ENERGIE GMBH (HRSG.): *Preisblatt für die Nutzung des 16,7-Hz-Bahnstromnetzes (Bahnstromnetz) gültig ab 1.1.2015*, Frankfurt am Main:  
URL: [https://www.dbenergie.de/file/dbenergie-de/2546910/oCRS0ws0Qpi89b4ZDhw47YC7dPI/7546464/data/Preisblatt\\_Netznutzung\\_2015.pdf](https://www.dbenergie.de/file/dbenergie-de/2546910/oCRS0ws0Qpi89b4ZDhw47YC7dPI/7546464/data/Preisblatt_Netznutzung_2015.pdf), letzter Zugriff am 19.04.2015

**DB Netz 405 2008**

DB Netz AG: *Richtlinie Fahrwegkapazität*. (gültig ab 01.01.2008)

**DB Netz 405.0201 2008**

DB Netz AG: *Richtlinie Fahrwegkapazität*. Modul 405.0201 (gültig ab 01.01.2008)

**DB Netz 405.0204A03 2008**

DB Netz AG: *Richtlinie Fahrwegkapazität*. Modul 405.0204 (gültig ab 01.01.2008)

**DB Netz 413.0502 2004**

DB NETZ AG: *Richtlinie Reisendensicherung auf höhengleichen Übergängen betrieblich planen*. Modul 413.0502 (gültig ab 01.07.2004)

**DB Netz 420.0105 2006**

DB NETZ AG (HRSG.): *Dispositionsregeln*. Modul 420.0105 (gültig ab 10.12.2006)

**DB Netz 813.0202 2012**

DB NETZ AG: *Richtlinie Bahnsteigzugänge konstruieren und bemessen*. Modul 813.0202 (gültig ab 15.10.2005)

**DB Netz 815.0032 2008**

DB NETZ AG: *Technische Sicherungen an Bahnübergängen anordnen*. Modul 815.0032 (gültig ab 01.11.2008)

**DB Netz 915.0107 2015**

DB NETZ AG (HRSG.): *Richtlinie Verhalten während der Zugfahrt*. Modul 915 (gültig ab 10.12.2006)

**DB Netz 2012**

DB NETZ AG (HRSG.): *Plan zur Erhöhung der Schienenwegkapazität (PEK) für den als vsl. in naher Zukunft überlastet erklärten Schienenweg Bahnhof Hamburg Hbf. Frankfurt/Main* :  
URL: [http://www.fahrgastbeirat.org/mediapool/57/574023/data/PEK\\_ZUeLS\\_Hamburg\\_Hbf.PDF](http://www.fahrgastbeirat.org/mediapool/57/574023/data/PEK_ZUeLS_Hamburg_Hbf.PDF), zuletzt aktualisiert am 10.01.2012, letzter Zugriff am 05.05.2015

**DB Netz 2014a**

DB NETZ AG (HRSG.): *Schienennetz-Benutzungsbedingungen der DB Netz AG 2015*. Frankfurt : ohne Verlag, 2014

**DB Netz 2014b**

DB NETZ AG: *EBWU – Fahrplanrobustheitsprüfung des Schienenpersonennahverkehrs zwischen Calw und Renningen*. Calw : ohne Verlag, 2014

**DB Netz 2015**

DB NETZ AG (HRSG.): *Geschäftsbericht 2014*. Frankfurt : ohne Verlag, 2015

**DB Schenker 2015**

DEUTSCHE BAHN AG (HRSG.): *Netzwerkbahn : Das Geschäftsmodell für ein zukunfts-fähiges Netzwerk*. Berlin :

URL: <http://www1.deutschebahn.com/netzwerkbahn/start/umfang.html>, zuletzt aktualisiert am 23.01.2015, letzter Zugriff am 14.05.2015

**DB Schenker o.J.**

DB SCHENKER RAIL AG (HRSG.): *Auf allen Gleisen in Deutschland und Europa zu Hause*. Mainz : URL: [http://www.rail.dbschenker.de/rail-deutschland-de/about\\_dbschenker/Interesting\\_Facts/Neuer\\_Inhalt/](http://www.rail.dbschenker.de/rail-deutschland-de/about_dbschenker/Interesting_Facts/Neuer_Inhalt/), letzter Zugriff am 12.05.2015

**Destatis 2013a**

STATISTISCHES BUNDESAMT (HRSG.): *Verkehr : Eisenbahnverkehr*. Fachserie 8, Reihe 2. Wiesbaden :

URL: [https://www.destatis.de/GPStatistik/servlets/MCRFileNodeServlet/DEHeft\\_derivate\\_00009405/2080200127004.pdf](https://www.destatis.de/GPStatistik/servlets/MCRFileNodeServlet/DEHeft_derivate_00009405/2080200127004.pdf), zuletzt aktualisiert am 12.04.2013, letzter Zugriff am 14.05.2015

**Destatis 2013b**

STATISTISCHES BUNDESAMT (HRSG.): *Öffentlicher Personennahverkehr : Plätze im Schnitt zu 22% ausgelastet*. Wiesbaden :

URL: [https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressemitteilungen/zdw/2013/PD13\\_041\\_p002.html](https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressemitteilungen/zdw/2013/PD13_041_p002.html), zuletzt aktualisiert am 08.10.2013, letzter Zugriff am 16.03.2015

**Destatis 2014**

STATISTISCHES BUNDESAMT (HRSG.): *Mikrozensus – Fragen zur Gesundheit : Körpermaße der Bevölkerung*. Wiesbaden :

URL: [https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Gesundheit/Gesundheitszustand/Koerpermasse5239003139004.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Gesundheit/Gesundheitszustand/Koerpermasse5239003139004.pdf?__blob=publicationFile), zuletzt aktualisiert am 05.11.2014, letzter Zugriff am 16.03.2015

**Drewello et al. 2013**

DREWELLO, Hansjörg; DITTRICH, Ingo; GÜTLE, Stephan: *Kapazitätsbelastung der Rheintalbahn*. In: *Internationales Verkehrswesen*, Jg. 65 (2013), Nr. 4, S. 48–51

**EIBV**

VERORDNUNG ÜBER DEN DISKRIMINIERUNGSFREIEN ZUGANG ZUR EISENBAHNINFRASTRUKTUR UND ÜBER DIE GRUNDSÄTZE ZUR ERHEBUNG VON ENTGELT FÜR DIE BENUTZUNG DER EISENBAHNINFRASTRUKTUR (EIBV) i.d.F. vom 03.06.2005 (BGBl. I S. 1566), zuletzt geändert durch Art. 2 Abs. 123 G v. 22.12.2011 I 3044

**EBO**

EISENBAHN-BAU- UND BETRIEBSORDNUNG (EBO) i.d.F. vom 25.7.2012 vom 8. Mai 1967 (BGBl. 1967 II S. 1563), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 25. Juli 2012 (BGBl. I S. 1703) geändert worden ist

**EEG**

ERNEUERBARE-ENERGIEN-GESETZ (EEG) i.d.F. vom 21.07.2014, das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 29. Juni 2015 (BGBl. I S. 1010) geändert worden ist

**Eichenberger 2007**

EICHENBERGER, Peter: *Kapazitätssteigerung durch ETCS*. In: *Signal+Draht*, Jg. 99 (2007), Nr. 3, S. 6–14

**Eickmann et al. 2008**

EICKMANN, Carla; KOHLRUSS, Jacob; SCHUMANN, Tilo: *Hafenhinterlandanbindung: Sinnvolle Koordination von Massnahmen im Schienenverkehr zur Bewältigung des zu erwartenden Verkehrsaufkommens*. Braunschweig, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrttechnik, Institut für Verkehrssystemtechnik, Abschlussbericht, 2008

**EKrG**

GESETZ ÜBER KREUZUNGEN VON EISENBAHNEN UND STRAßEN (EISENBAHNKREUZUNGSGESETZ) (EKrG) i. d. F. vom 21. März 1971 (BGBl. I S. 337), das zuletzt durch Artikel 281 der Verordnung vom 31. Oktober 2006 (BGBl. I S. 2407) geändert worden ist

**FAG o.J.**

FAG KUGELFISCHER AG: *FAG Radsatz- und Getriebelager in der Berliner S-Bahn : Beispiele aus der Anwendungstechnik*. Schweinfurt :  
URL: [http://www.schaeffler.com/remotemedien/media/\\_shared\\_media/08\\_media\\_library/01\\_publications/schaeffler\\_2/publication/downloads\\_18/wl\\_07511\\_de\\_de.pdf](http://www.schaeffler.com/remotemedien/media/_shared_media/08_media_library/01_publications/schaeffler_2/publication/downloads_18/wl_07511_de_de.pdf), letzter Zugriff am 16.05.2015

**Fassbinder 2011**

FASSBINDER, Stefan: *Energieeffizienz im Schienenverkehr*. In: *Elektropraktiker*, Jg. 65 (2011), Nr. 2, S. 131-135

**Fengler/Böttcher 2007**

FENGLER, Wolfgang; BÖTTCHER, Jochen: *Eisenbahnknoten strukturiert analysieren*. In: *Eisenbahntechnische Rundschau*, Jg. 56 (2007), Nr. 9, S. 526–532

**Filipovic 2005**

FILIPOVIC, Zarko: *Elektrische Bahnen : Grundlagen, Triebfahrzeuge, Stromversorgung*. 4. überarbeitete Auflage. Berlin : Springer Verlag, 2005

**FIS 2013**

FORSCHUNGSIONFORMATIONSSYSTEM; BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR (HRSG.): *Betriebstechnische Grenzparameter für Güterzüge*. Bonn : URL: <http://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/324625/>, zuletzt aktualisiert am 21.10.2013, letzter Zugriff am 17.03.2015

**FIS 2014**

FORSCHUNGSIONFORMATIONSSYSTEM; BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR (HRSG.): *Daten und Fakten zum Energieverbrauch des Schienenverkehrs*. Bonn : URL: <http://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/342234/>, zuletzt aktualisiert am 31.03.2014, letzter Zugriff am 31.03.2015

**Frank 2013**

FRANK, Patrick: *Methodik zur Effizienzbeurteilung der Kapazitätsnutzung und -entwicklung von Bahnnetzen*. Zürich, Eidgenössische Technische Hochschule, Dissertation, 2013

**Geiß 2002**

GEIß, Günter: *CIR-Elke im Betrieb*. In: *Eisenbahningenieur*, Jg. 53 (2002), Nr. 9, S. 60-63

**Gerber 2013**

GERBER, Ulf (2013): *Auslegung des Eisenbahnoberbaus*. In: FENDRICH, Lothar, FENGLER, Wolfgang (HRSG.): *Handbuch Eisenbahninfrastruktur*. 2. neu bearbeitete Auflage. Berlin : Springer Verlag, 2013, S. 39–64

**Gille 2014**

GILLE, Andreas: *Ein neuer Ansatz zur Kapazitätsbestimmung von Bahnsystemen*. Braunschweig, Technische Universität, Dissertation, 2014

**Hansen/Pachl 2014**

HANSEN, Ingo Arne; PACHL, Jörn (HRSG.): *Railway Timetabling & Operations*. Hamburg: Eurailpress, 2014

**Hechenberger et al. 2011**

HECHENBERGER, Alfred; KIEWERT, Frank; GROH, Thomas; SCHWARZER, Maik; KRÖTZ, Werner; LANKES, Peter; MATSCHKE, Gerd, RHODE, Thomas; TROCKELS, Ingo: *Elektrischer Betrieb bei der Deutschen Bahn im Jahre 2010*. In: *Elektrische Bahnen*, Jg. 109 (2011), Nr. 1-2, S. 3-49

**Hecht et al. 2008**

HECHT, Markus; KLEEMANN, Uwe; FORCHER, Peter; LÜBKE, Dietmar; MITTMANN, Walter: *Schienenfahrzeuge*. In: LÜBKE, Dietmar: *Das System Bahn*. Hamburg : DVV Media Group, 2008, S. 425-504

**Hecht/Keudel 2006**

HECHT, Markus; KEUDEL, Johannes: *Verbesserte Energieeffizienz durch radialeinstellendes Fahrwerk : Beispiel LEILA Güterwagendrehgestell*. In: *Eisenbahningenieur*, Jg. 57 (2006), Nr. 5, S. 42-47

**Heister 2005**

HEISTER, Gert: *Eisenbahnbetriebstechnologie*. Heidelberg : Eisenbahn-Fachverlag, 2005

**Hempe 2006**

HEMPE, Thomas: *Ein LCC-basiertes Verfahren zur Evaluierung von Schleifstrategien für Schienenbahnen*. Hannover, Gottfried Wilhelm Leibnitz Universität, Institut für Verkehrswesen, Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie, Dissertation, 2006

**Hempe/Siefer 2007**

HEMPE, Thomas; SIEFER, Thomas: *Schienenschleifen als Bestandteil einer technisch-wirtschaftlichen Gleisinstandhaltung*. ohne Ort. :  
URL: <http://www.speno.ch/pdf/0507.pdf>, zuletzt aktualisiert am 03.03.2007, letzter Zugriff am 26.04.2015

**Holzhey 2010**

HOLZHEY, Michael; UMWELTBUNDESAMT (HRSG.): *Schienennetz 2025 / 2030 : Ausbaukonzept für einen leistungsfähigen Schienengüterverkehr in Deutschland*. Dessau : ohne Verlag, 2010

### **Horvát 2014**

HORVÁT, Ferenc: *Energie-Mehrverbrauch im Zusammenhang mit Gleislagequalität*. Berlin, Verband der Bahnindustrie, Sitzung der ERI AG Energieeffizienz, Vortrag, 2014

### **Horvát/Kiss 2006**

HORVÁT, Ferenc; KISS, Ferenc: *Streckenbewirtschaftung in Relation von Gleislagequalität zu Traktionsenergieverbrauch*. In: *Eisenbahntechnische Rundschau*, Jg. 55 (2006), Nr. 11, S. 798–805

### **Hunger/Mohrich 2013**

HUNGER, Eberhard; MOHRICH, Jörg: *Stromversorgung der Infrastruktur*. In: FENDRICH, Lothar; FENGLER, Wolfgang (Hrsg.): *Handbuch Eisenbahninfrastruktur*. 2. neu bearbeitete Auflage. Berlin : Springer Verlag, 2013, S. 757-798

### **IEMB 2006**

KOMPETENZZENTRUM „KOSTENGÜNSTIG QUALITÄTSBEWUSST BAUEN“ IM INSTITUT FÜR ERHALTUNG UND MODERNISIERUNG VON BAUWERKEN E.V. (HRSG.): *Lebensdauer von Bauteilen und Bauteilschichten*. Berlin : URL: [http://www.ksb-hi.de/4\\_3\\_3\\_Lebensdauer\\_Bauteile.pdf](http://www.ksb-hi.de/4_3_3_Lebensdauer_Bauteile.pdf), zuletzt aktualisiert im Dezember 2006, letzter Zugriff am 27.04.2015

### **Jänsch 1990**

JÄNSCH, Eberhard: *Energieverbrauch und klimarelevante Emissionen im Personenfernverkehr*. In: *Elektrische Bahnen*, Jg. 88 (1990), Nr. 8, S. 307-315

### **Janecek et al. 2012**

JANECEK, David; KUCKELBERG, Alexander; NIEßEN, Nils: *Kapazitätsermittlung von Eisenbahnknoten und -strecken*. In: *Eisenbahntechnische Rundschau*, Jg. 61 (2012), Nr. 10, S. 30–36

### **Kettner 2011**

KETTNER, Joachim: *Das DB Eco Programm der Deutschen Bahn*. In: *ZEVRail*, Jg. 135 (2011), Nr. 3, S. 88-93

### **Koppatsch 1996**

KOPPATSCH, Georg: *Das Energiesparprogramm 2005 der Deutschen Bahn AG*. In: *Eisenbahntechnische Rundschau*, Jg. 45 (1996), Nr. 1-2, S. 15–20

### **Krug 2001**

KRUG, Al; WHITE, Thomas (Hrsg.): *Managing Railroad Transportation*. Mountlake Terrace : VTD Rail Publishing, 2001



### **Leister 2011**

LEISTER, Hans: *Energierückgewinnung beim Bremsen : DB AG bremst Vorteil des elektrischen Verkehrs aus.* In: *Eisenbahn-Revue-International*, Jg. 17 (2011), Nr. 3, S. 145-149

### **Lichtberger 2010**

LICHTBERGER, Bernhard: *Handbuch Gleis: Unterbau, Oberbau, Instandhaltung, Wirtschaftlichkeit.* 3. komplett überarbeitete Neuauflage. Hamburg : DVV Media Group, 2010

### **Lienau 2007**

LIENAU, Cay: *Abbildung von Infrastrukturkosten in der Eisenbahnbetriebssimulation.* Hannover, Gottfried Wilhelm Leibnitz Universität, Institut für Verkehrsweisen, Fakultät für Bauingenieurswesen und Geodäsie, Dissertation, 2006

### **Lienau/Siefer 2007**

LIENAU, Cay; SIEFER, Thomas: *Abbildung von Infrastrukturkosten in der Eisenbahnbetriebssimulation.* In: *Eisenbahntechnische Rundschau*, Jg. 56 (2007), Nr. 12, S. 799-805

### **Mallikat 2014**

MALLIKAT, Jürgen: *Präsentation effizienter Fahrzeuge für wachsenden Güterverkehr.* In: *Güterbahnen*, Jg. 13 (2014), Nr. 3, S. 11-16

### **Marek et al. 2010**

MAREK, Hanko; ORELLANO, Alexander; SCHÖBER, Martin: *Energieeffiziente Schienenfahrzeuge und Standardisierung.* In: *Eisenbahntechnische Rundschau*, Jg. 59 (2010), Nr. 10, S. 710-717

### **Maschek 2013**

MASCHEK, Ulrich: *Leit- und Sicherungstechnik.* In: FENDRICH, Lothar; FENGLER, Wolfgang (Hrsg.): *Handbuch Eisenbahninfrastruktur.* 2. neu bearbeitete Auflage. Berlin : Springer Verlag, 2013, S. 495-551

### **Mofair/Netzwerk 2014**

MOFAIR E.V.; NETZWERK EUROPÄISCHER EISENBAHNEN E.V.: *Wettbewerber-Report Eisenbahn 2013/2014.* Berlin : URL: [http://www.mofair.de/content/2013-2014\\_wettbewerber-report.pdf](http://www.mofair.de/content/2013-2014_wettbewerber-report.pdf), zuletzt aktualisiert im November 2013, letzter Zugriff am: 26.04.2015

### **Morgenstern/Ebinger 2008**

MORGENSTERN, Jens; EBINGER, Ingwer: *Anforderungen an zukünftige Klimaanlagen für Schienenfahrzeuge.* In: *Eisenbahningenieur*, Jg. 59 (2008), Nr. 12, S. 24-31

**Middendorf/Müller 1999**

MIDDENDORF, Ehrenfried; MÜLLER, Ralph: *Lokomotiven für Europa – Die Güterzuglokomotive der BR 185 von DB Cargo*. In: *Eisenbahn-Revue International*, Jg. 5 (1999), Nr. 9, S. 355-365

**Müller 2014**

MÜLLER, Christoph: *Anschlag für Tunnel Falkenberg*. In: *Der Eisenbahningenieur*, Jg. 65 (2014), Nr. 4, S. 67

**NABU o.J.**

NABU OLDENBURGER LAND E.V.: *Kleingewässer*. Oldenburg :  
URL: [http://www.nabu-oldenburg.de/wasser/o\\_kleingewaesser.php](http://www.nabu-oldenburg.de/wasser/o_kleingewaesser.php), letzter Zugriff am 06.05.2015

**Nahverkehr Rheinland 2015**

NAHVERKEHR RHEINLAND GMBH (HRSG.): *Bahnknoten Köln : Maßnahmen gegen den Kollaps – fit für die Zukunft*. Köln :  
URL: [https://www.nvr.de/fileadmin/Dateien/PDF/BahnknotenKoeln\\_Massnahmenkatalog\\_20150424.pdf](https://www.nvr.de/fileadmin/Dateien/PDF/BahnknotenKoeln_Massnahmenkatalog_20150424.pdf), zuletzt aktualisiert im April 2014, letzter Zugriff am 05.05.2015

**Netztransparenz 2015**

NETZTRANSPARENZ.DE: *EEG-Umlage 2015*. ohne Ort. :  
URL: <http://www.netztransparenz.de/de/EEG-Umlage.htm>, letzter Zugriff am 19.04.2015

**Nick 2000**

NICK, Manfred: *Powerpacks für Dieseltriebwagen*. In: *der Eisenbahningenieur*, Jg. 51 (2000), Nr. 7, S. 42-46

**Nick 2002**

NICK, Manfred: *Hybridantrieb mit Nutzung der Bremsenergie bei Dieseltriebwagen*. In: *der Eisenbahningenieur*, Jg. 53 (2002), Nr. 9, S. 76-87

**Oetting/Glienicke 2010**

OETTING, Andreas; GLIENICKE, Jan: *FreeFloat – Technologische Innovationen zur Steigerung der Kapazität im bestehenden Netz*. In: *Eisenbahntechnische Rundschau*, Jg. 59 (2010), Nr. 12, S. 824-829

**Pachl 2013a**

PACHL, Jörn: *Systemtechnik des Schienenverkehrs : Bahnbetrieb planen, steuern und sichern*. 7. überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2013

### **Pachl 2013b**

PACHL, Jörn: *Betriebsführung der Infrastruktur*. In: FENDRICH, Lothar; FENGLER, Wolfgang (Hrsg.): *Handbuch Eisenbahninfrastruktur*. 2. neu bearbeitete Auflage. Berlin : Springer Verlag, 2013, S. 405-440

### **Pelz et al. 2008**

PELZ, Michael; EICKMANN, Carla; LEMMER, Karsten: *Innovative Sicherungstechnik mit optischen Systemen*. In: *Eisenbahningenieur*, Jg. 59 (2008), Nr. 8, S. 11-17

### **Perschbacher 2011**

PERSCHBACHER, Michael: *Bahnenergieversorgung der DB*. In: *Elektrische Bahnen*, Jg. 109 (2011), Nr. 1-2, S. 50-54

### **Petermann et al. 2010**

PETERMANN, Thomas; BRADKE, Harald; LÜLLMANN, Arne, POETZSCH, Maik; RIEHM, Ulrich: *Gefährdung und Verletzbarkeit moderner Gesellschaften – am Beispiel eines großräumigen Ausfalls der Stromversorgung*. Karlsruhe :  
URL: <http://www.tab-beim-bundestag.de/de/pdf/publikationen/berichte/TAB-Arbeitsbericht-ab141.pdf>, zuletzt aktualisiert November 2010, letzter Zugriff am 20.02.2015

### **Pohl 2008**

POHL, Michael: *Seehafenhinterlandverkehr : Neue Anforderungen an Strecken und Knoten der DB Netz AG*. In: *Eisenbahntechnische Rundschau*, Jg. 57 (2008), Nr. 4, S. 196-202

### **Popanda 2014**

POPANDA, Werner: *Umbau am "Bahnübergang Grenzhöfer Weg": Wer übernimmt die Kosten?* In: *Rhein-Neckar-Zeitung*, Heidelberg :  
URL: [http://www.rnz.de/nachrichten/heidelberg\\_artikel,-Umbau-am-Bahnuebergang-Grenzhoefer-Weg-Wer-uebernimmt-die-Kosten-\\_arid,68832.html](http://www.rnz.de/nachrichten/heidelberg_artikel,-Umbau-am-Bahnuebergang-Grenzhoefer-Weg-Wer-uebernimmt-die-Kosten-_arid,68832.html), zuletzt aktualisiert am 09.12.2014, letzter Zugriff am 27.04.2015

### **Pott-Stahmeyer/Heibel 2014**

POTT-STAHMEYER, Mathias; HEIBEL, Annett: *Der Bahnhof als Umweltvorreiter*. In: *Eisenbahntechnische Rundschau*, Jg. 63 (2014), Nr. 5, S. 30-34

### **Pro Bahn 2014**

FAHRGASTVERBAND PRO BAHN: *Kochelseebahn : Bahnhof Bichl*. Berlin :  
URL: [http://www.pro-bahn.de/weilheim/kochelseebahn/bichl\\_2013.htm](http://www.pro-bahn.de/weilheim/kochelseebahn/bichl_2013.htm), zuletzt aktualisiert am 16.03.2014, letzter Zugriff am 04.05.2015

### **Reinhardt 2012**

REINHARDT, Winfried: *Öffentlicher Personennahverkehr : Technik – rechtliche und betriebswirtschaftliche Grundlagen*. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 2012

### **Rödermark 2015**

STADT RÖDERMARK (HRSG.): *Dreieichbahn wieder im Normaltempo*. Rödermark :  
URL: [http://www.roedermark.de/index.php?id=93&tx\\_ttnews%5Btt\\_news%5D=4778&tx\\_ttnews%5BbackPid%5D=1&cHash=39ca7e646bbcf10aa65c34211fa5c3cd](http://www.roedermark.de/index.php?id=93&tx_ttnews%5Btt_news%5D=4778&tx_ttnews%5BbackPid%5D=1&cHash=39ca7e646bbcf10aa65c34211fa5c3cd), zuletzt aktualisiert am 07.05.2015, letzter Zugriff am 15.05.2015

### **Rötz 2014**

RÖTZ, Klaus-Ulrich; GEWERKSCHAFT DEUTSCHER LOKOMOTIVFÜHRER (HRSG.): *Technischer Vergleich der ICE-Züge ICE 3 (BR 403/406) mit Velaro D (BR 407)*. Frankfurt/Main : URL: <http://www.gdl.de/uploads/Service/BroschuereTechnik-1394734196.pdf>, zuletzt aktualisiert im Februar 2014, letzter Zugriff am 12.03.2015

### **Sachs 2015**

SACHS, Janina: *Anfrage an Ansprechpartner : Hilfe für Masterarbeit / Kosten von vorgelagerten Lichtzeichen zur Sicherung eines BÜ*. E-Mailverkehr vom 20.05.2015

### **Sandor/Wiebe 2011**

SANDOR, Judit; WIEBE, Enno: *Railenergy: Energieeffiziente Traktion und Infrastruktur für Europas Bahnen*. In: *Eisenbahningenieur*, Jg. 62 (2011), Nr. 10, S. 36-37

### **Sanftleben et al. 2001**

SANFTLEBEN, Dirk; SONNTAG, Hartmuth; WEBER, Kai: *Verfahren "Energiesparende Fahrweise" – ESF*. In: *Eisenbahntechnische Rundschau*, Jg. 50 (2001), Nr. 9, S. 510–517

### **Schach/Jehle/Naumann 2006**

SCHACH, Rainer; JEHLE, Peter; NAUMANN, René: *Transrapid und Rad-Schiene-Hochgeschwindigkeitsbahn*. Berlin : Springer Verlag, 2006

### **Schmidt 1988**

SCHMIDT, Peter: *Energieversorgung elektrischer Bahnen*. Berlin : Transpress VEB Verlag für Verkehrswesen, 1988

### **Schmitt/Jänsch 2013**

SCHMITT, Anton; JÄNSCH, Eberhard: *Querschnittsgestaltung der Bahnanlagen*. In: FENDRICH, Lothar; FENGLER, Wolfgang (Hrsg.): *Handbuch Eisenbahninfrastruktur*. 2. neu bearbeitete Auflage. Berlin : Springer Verlag, 2013, S. 307-336

**Scholdan et al. 2011**

SCHOLDAN, Detlef; GABRIEL, Norbert; KIK, Walter: *RC25NT – ein neues, gleisfreundliches Drehgestell für den schweren Güterverkehr*. In: *ZEVRail*, Jg. 135 (2011), Sonderheft Tagungsband der 40. Tagung an der Technischen Universität Graz, S. 154-161

**Schöne 2013**

SCHÖNE, Eric: *Bahnübergänge*. In: FENDRICH, Lothar; FENGLER, Wolfgang (Hrsg.): *Handbuch Eisenbahninfrastruktur*. 2. neu bearbeitete Auflage. Berlin : Springer Verlag, 2013, S. 643-679

**Schröder-Baumgart 1995**

SCHRÖDER-BAUMGART, Reinhart: *Strategisches Instrumentarium zur Bewertung von Oberbaukosten (SBO) ein Einflußgrößenverfahren*. In: *Eisenbahntechnische Rundschau*, Jg. 44 (1995), Nr. 3, S. 165-171

**Schüler-Hainsch 1991**

SCHÜLER-HAINSCH, Eckhard: *Verfahren zur Optimierung des Energieverbrauchs von Zugfahrten*. VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 12, Nr. 157. Düsseldorf : VDI Verlag, 1991

**Schweers 2014**

SCHWEERS, Hans (Hrsg.): *Eisenbahnatlas Deutschland*. 9. Aufl. Köln : Schweers + Wall, 2014

**Seifert 2003**

SEIFERT, Arno: *Das Energiesparprogramm 2005 der Deutschen Bahn AG – eine Zwischenbilanz*. In: *Eisenbahntechnische Rundschau*, Jg. 52 (2003), Nr. 12, S. 754–757

**Sewcyk 2004**

SEWCYK, Bernd (2004): *Makroskopische Abbildung des Eisenbahnbetriebs in Modellen zur langfristigen Infrastrukturplanung*. Hannover, Universität Hannover, Dissertation, 2004

**Siefer/Kollenberg 2007**

SIEFER, Thomas; KOLLENBERG, Christian: *Ertüchtigung des norddeutschen Eisenbahnnetzes für den wachsenden Schienengüterverkehr*. Hannover, Gottfried Wilhelm Leibnitz Universität, Institut für Verkehrswesen, Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie, Studie, 2007

**Siemens o.J.**

SIEMENS AG (HRSG.): *Fact Sheet: Velaro D – Neuer ICE 3 (Baureihe 407)*. München :  
URL: <http://www.siemens.com/press/pool/de/feature/2013/infrastructure-cities/2013-12-ice/factsheet-velaro-d-de.pdf>, letzter Zugriff am 11.03.2015

**Speiser 2011**

SPEISER, Norbert: *Die grundsätzliche Funktionsweise der punktförmigen Zugbeeinflussung PZB 90*. In: *BahnPraxis* Jg. 18 (2011), Nr. 3, S. 3-6

**Stadler o.J.**

STADLER PANKOW GMBH: *Fahrzeugflotte : Elektrischer Doppelstocktriebzug KISS für die BeNEX GmbH/NETINERA Deutschland GmbH*. Berlin :  
URL: [http://www.stadlerrail.com/media/uploads/STA-1432-031\\_KISS-ODEG\\_D\\_web.pdf](http://www.stadlerrail.com/media/uploads/STA-1432-031_KISS-ODEG_D_web.pdf), letzter Zugriff am 19.03.2015

**Steimel 2006**

STEIMEL, Andreas: *Elektrisch Triebfahrzeuge und ihre Energieversorgung : Grundlagen und Praxis*. 2. überarbeitete Auflage. München : Oldenbourg Industrieverlag, 2006

**Steiner/Pagiela 2005**

STEINER, Michael; PAGIELA; Stanislaus: *Energiespeicher in Schienenfahrzeugen*. In: *Eisenbahntechnische Rundschau*, Jg. 54 (2005), Nr. 4, S. 207-214

**Stephan 2014**

STEPHAN, Arndt: *Elektrische Bahnsysteme : Gastvorlesung an der TU Berlin*. Sommersemester 2014. Berlin, Technische Universität

**Stephan/Zweig 2013**

STEPHAN, Arndt; ZWEIG, Bernd-Wolfgang: *Energieversorgung elektrischer Bahnen*. In: FENDRICH, Lothar; FENGLER, Wolfgang (Hrsg.): *Handbuch Eisenbahninfrastruktur*. 2. neu bearbeitete Auflage. Berlin : Springer Verlag, 2013, S. 681-756

**Sternemann/Laffin 2009**

STERNEMANN, Peter; LAFFIN, Jörg: *Erschließung Lippewohnpark : Kreisverkehr oder Lichtsignalanlage*. Lünen :  
URL: [https://www.luenen.de/medien/politik/dok/Anlage\\_zu\\_TOP\\_A\\_I1\\_03.02.09.pdf](https://www.luenen.de/medien/politik/dok/Anlage_zu_TOP_A_I1_03.02.09.pdf), zuletzt aktualisiert am 03.02.2009, letzter Zugriff am 18.05.2015

**StromStG 2012**

STROMSTEUERGESETZ (i.d.F. der Änderung durch Art. 2 V v. 05.12.2012)

### **VDV 2015**

VERBAND DEUTSCHER VERKEHRSUNTERNEHMEN E.V. (HRSG.): *Investitionsbedarf für das Bundes- schienenwegenetz aus Sicht der Nutzer : Siebte VDV-Maßnahmenliste*. Köln : URL: <https://www.vdv.de/positionensuche.aspx?id=cd004a93-8548-4390-bd37-811a9e2fdea3&mode=detail>, zuletzt aktualisiert am 20.02.2015, letzter Zugriff am 05.05.2015

### **Via 2014**

VIA CONSULTING & DEVELOPMENT GMBH; RAILISTICS GMBH: *Folgen von Geschwindigkeitsbegrenzungen für den Schienengüterverkehr aus Lärmschutzgründen : Management Summary*. ohne Ort. : URL: [http://www.bdi.eu/download\\_content/InfrastrukturUndLogistik/Studie\\_Gutachten\\_Schienenlaerm\\_Management\\_Summary\\_141021.pdf](http://www.bdi.eu/download_content/InfrastrukturUndLogistik/Studie_Gutachten_Schienenlaerm_Management_Summary_141021.pdf), zuletzt aktualisiert am 13.10.2014, letzter Zugriff am 19.03.2015

### **Warninghoff/Kerth 2012**

WARNINGHOFF, Carsten-Rainer; KERTH, Steffen: *Infrastrukturanforderungen für das Bundesschienenwegenetz aus Sicht der Nutzer*. In: *Eisenbahntechnische Rundschau*, Jg. 61 (2012), Nr. 4, S. 18–23

### **Weigand 2009**

WEIGAND, Werner: *Mehr Kapazität für den Schienenverkehr – Reicht das bestehende Streckennetz aus?* In: *Eisenbahntechnische Rundschau*, Jg. 58 (2009), Nr. 12, S. 722–727

### **Weigand 2012**

WEIGAND, Werner: *Langfristfahrplan und Kapazitätsuntersuchungen : Infrastruktur-Weiterentwicklung*. In: *Deine Bahn*, Jg. 40 (2012), Nr. 5, S. 28–31

### **Wende 2003**

WENDE, Dietrich: *Fahrdynamik des Schienenverkehrs*. Wiesbaden : Vieweg-Teubner Verlag, 2003

### **Wendler 1995**

WENDLER, Ekkehard: *Weiterentwicklung der Sperrzeitentreppe für moderne Signalsysteme*. In: *Signal+Draht*, Jg. 87 (1995), Nr. 7-8, S. 268–273

### **Wendler 2011**

WENDLER, Ekkehard: *Berechnung der Kapazität von Eisenbahnstrecken*. In: *Deine Bahn*, Jg. 39 (2011), Nr. 12, S. 6–13

**Wendler et al. 2012**

WENDLER, Ekkehard; GRÖGER, Thomas; NIEßEN, Nils: *Kapazitätsverbrauch rahmenvertraglich gebundener Zugfahrten*. In: *Eisenbahntechnische Rundschau*, Jg. 61 (2012), Nr. 1+2, S. 15–21

**Wittenbrink 2012**

WITTENBRINK, Paul: *Systemkostenvergleich Straße und Schiene im Güterverkehrsbereich*. In: *Güterbahnen*, Jg. 11 (2012), Nr. 2, S. 14–17

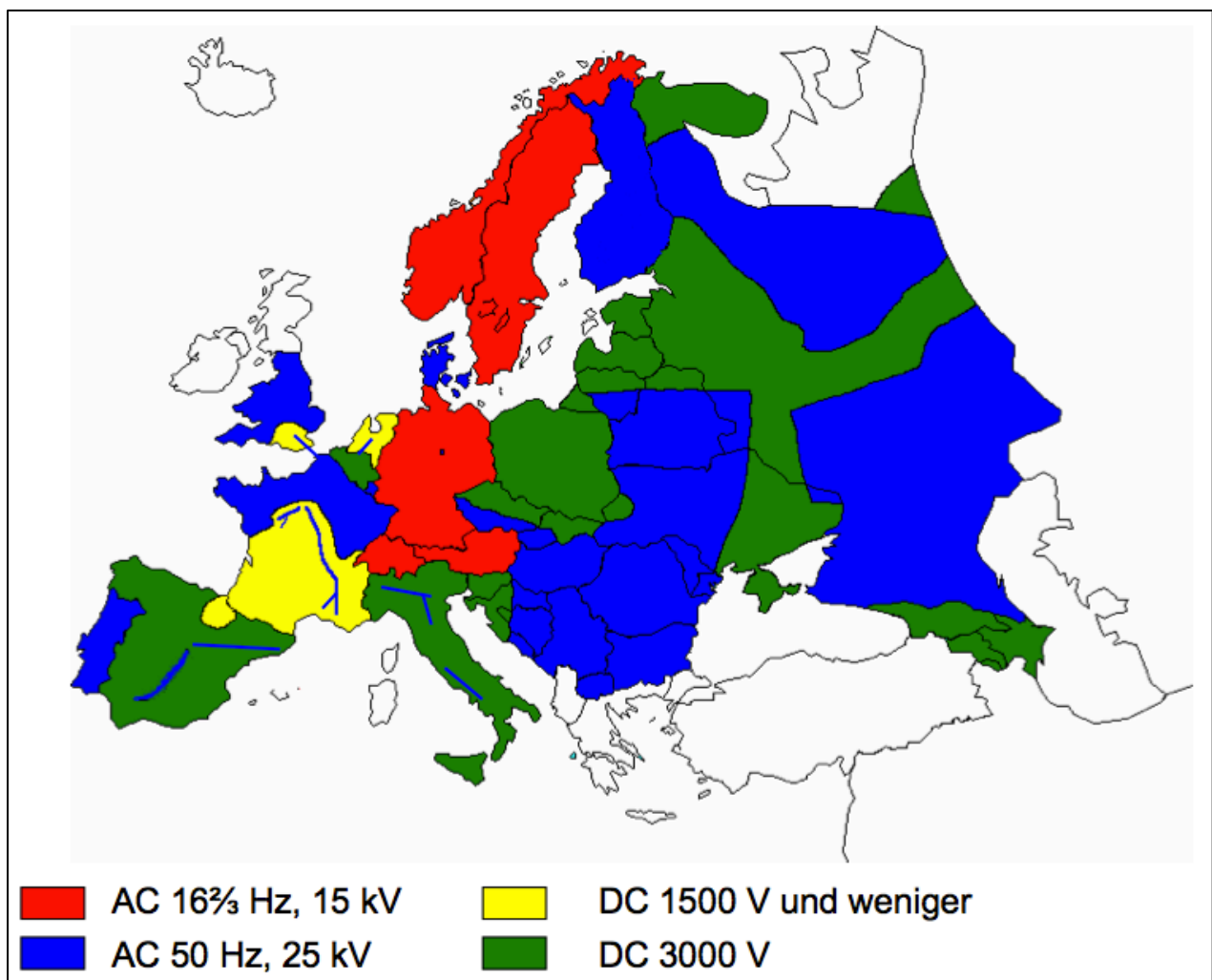


## Anhangsverzeichnis

<i>Anhang 1: Bahnstromsysteme in Europa (grafische Darstellung) .....</i>	<i>XXXV</i>
<i>Anhang 2: Übertragungs- und Verteilungsanlagen in Deutschland im Jahr 2011 .....</i>	<i>XXXVI</i>
<i>Anhang 3: Speiseabschnitt eines Unterwerks.....</i>	<i>XXXVII</i>
<i>Anhang 4: Beispielrechnung für die Verifikation.....</i>	<i>XXXVIII</i>
<i>Anhang 5: Strukturierung der verschiedenen Lösungsräume .....</i>	<i>XXXIX</i>
<i>Anhang 6: Engpassliste Kanten (zweigleisig) .....</i>	<i>XL</i>
<i>Anhang 7: Engpassliste Kanten (eingleisig) .....</i>	<i>XL</i>
<i>Anhang 8: Engpassliste Kanten (Sonderfälle).....</i>	<i>XL I</i>
<i>Anhang 9: La-Stellen Übersicht.....</i>	<i>XLII</i>
<i>Anhang 10: Kategorisierung Infrastrukturmaßnahmen .....</i>	<i>XLIII</i>
<i>Anhang 11: La-Stellen Energiemehrbedarfsrechnung.....</i>	<i>XLIV</i>
<i>Anhang 12: Berechnungstool Infrastrukturkosten.....</i>	<i>XLV</i>
<i>Anhang 13: La-Stellen Kostenrechner Maßnahmen.....</i>	<i>XLV</i>
<i>Anhang 14: Bsp. für das Anordnen vorgeschalteter Lichtzeichen.....</i>	<i>XLV</i>
<i>Anhang 15: Knoten Energiemehrbedarfsrechnung.....</i>	<i>XLVI</i>
<i>Anhang 16: OpenTrack-Simulationsdaten .....</i>	<i>XLVI</i>

## Anhänge

### Anhang 1: Bahnstromsysteme in Europa (grafische Darstellung)



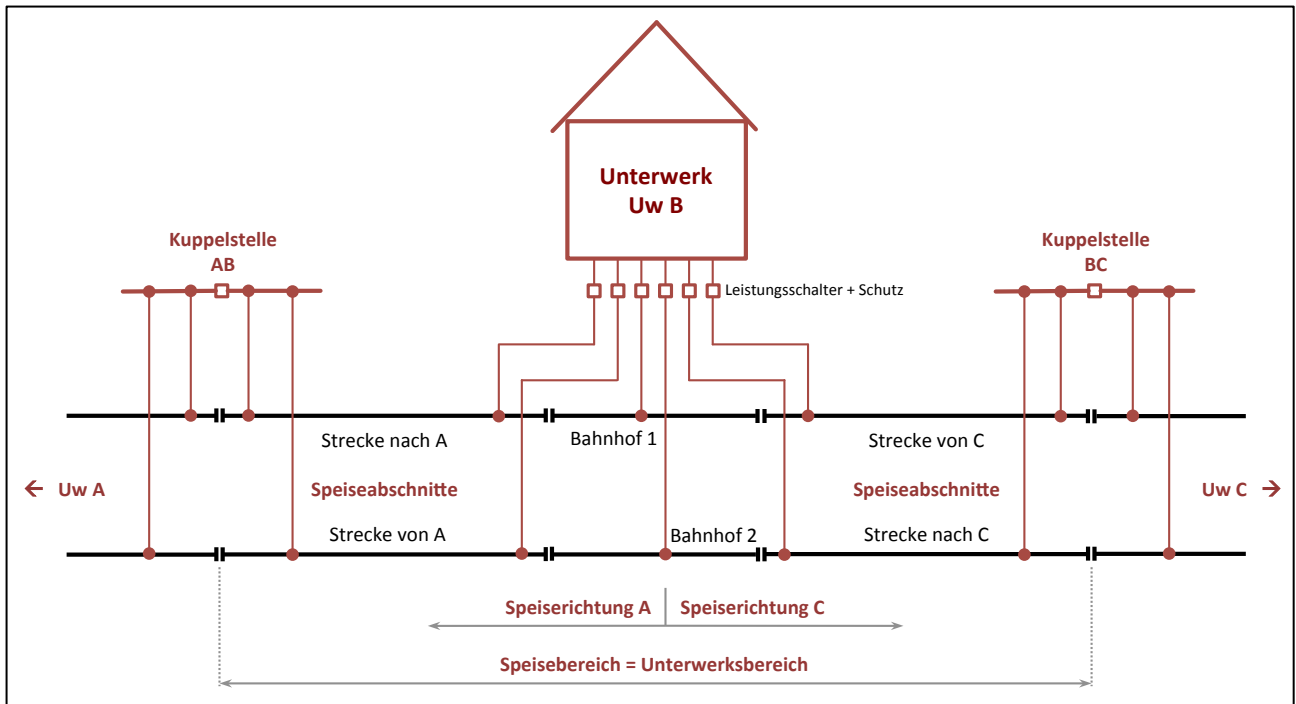
Quelle: Stephan 2014, S. 34

## Anhang 2: Übertragungs- und Verteilungsanlagen in Deutschland im Jahr 2011



Quelle: Hechenberger et al. 2011, S. 21

### Anhang 3: Speiseabschnitt eines Unterwerks

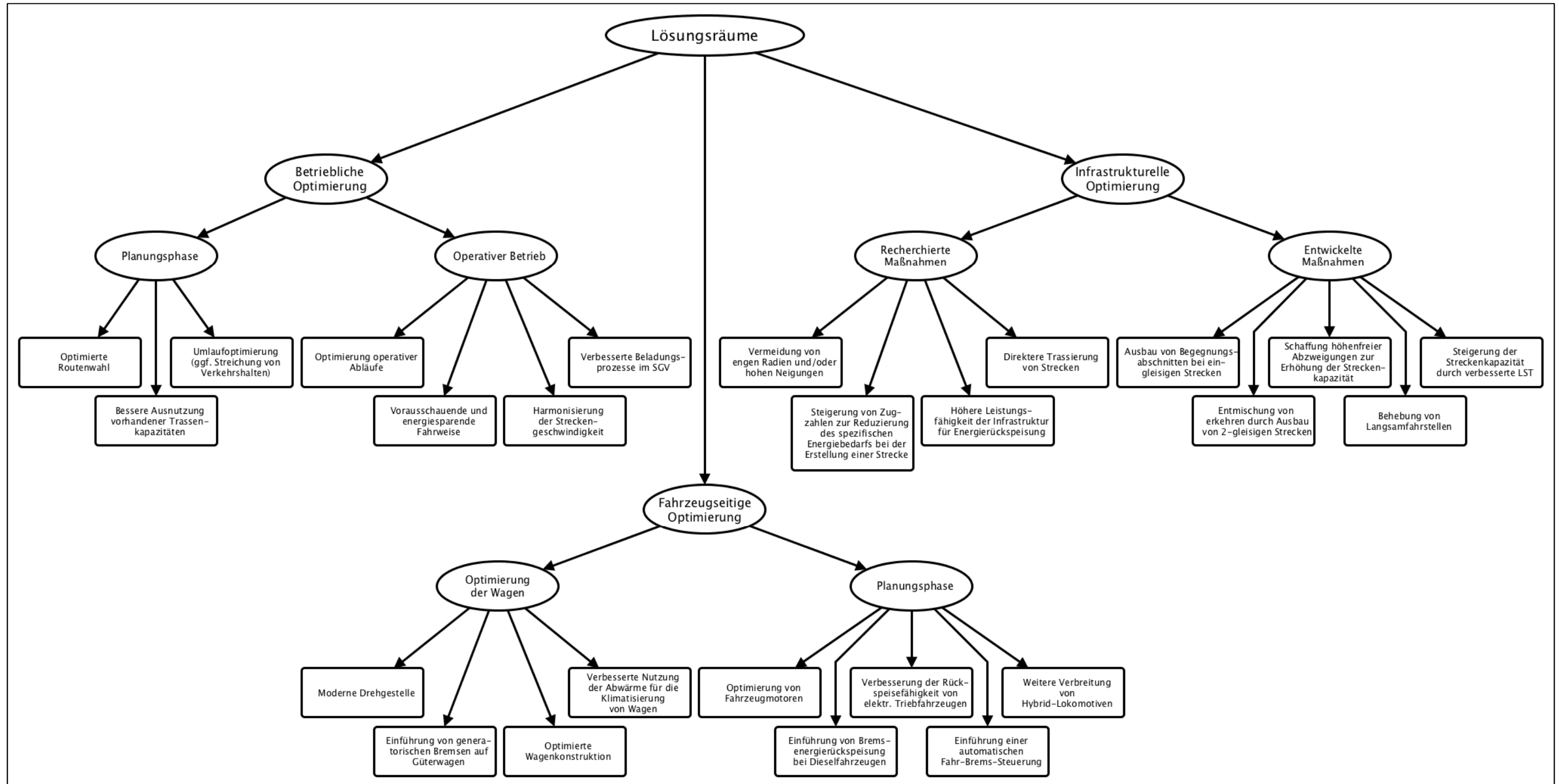


Quelle: Veränderte Darstellung nach: Stephan/Zweig 2013, S. 683

Anhang 4: Beispielrechnung für die Verifikation<sup>141</sup>

		A1										A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10		
Strecke	Name	Einheit	Abschnitt 1	Abschnitt 2	Abschnitt 3	Abschnitt 4	Abschnitt 5	Abschnitt 6	Abschnitt 7	Abschnitt 8	Abschnitt 9	Abschnitt 10	Σ	Ø								
	max. Streckengeschwindigkeit	$v_{max}$ [km/h]	120	120	230	230	230	230	230	230	230	230										
	Steigung	$i$ [%]	3	5	1	-1	-2	0	1	0	-1	0										
	Bögen	$R$ [m]	500	1.500	1.500	2.500	0	2.500	2.500	0	2.500	2.500										
	Abschnittslänge	$L$ [km]	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8										
SPV	Kennwerte	max. Abschnittsgeschwindigkeit	$v_{max}$ [km/h]	120	120	230	230	230	230	230	230	230	230									
		Geschwindigkeitsdelta	$\Delta v$ [km/h]	120	0	110	0	0	0	0	0	0	0									
		Bruttogewicht des Zuges	$m_{Br}$ [t]	471	471	471	471	471	471	471	471	471	471									
		Beschleunigung des Zuges	$a$ [m/s <sup>2</sup> ]	0,5	0,5	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5									
		Beschleunigungsdauer	$t$ [s]	66,67	0,00	61,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00									
		Beschleunigungsweg	$l_a$ [km]	1,1	0,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0									
		Massenfaktor	$\xi$ [1]	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1									
		Wirkungsgrad Fahrmotor	$\eta_{Fz}$ [%]	80,0%	80,0%	80,0%	80,0%	80,0%	80,0%	80,0%	80,0%	80,0%	80,0%									
		Wirkungsgrad Fahrleitung	$\eta_{Fl}$ [%]	97,0%	97,0%	97,0%	97,0%	97,0%	97,0%	97,0%	97,0%	97,0%	97,0%									
		Widerstände	spez. Neigungswiderstand	$w_i$ [%]	3,0000	5,0000	1,0000	-1,0000	-2,0000	0,0000	1,0000	0,0000	-1,0000	0,0000								
	spez. Bogenwiderstand		$w_b$ [%]	1,0638	1,0638	1,0638	1,0638	1,0638	1,0638	1,0638	1,0638	1,0638	1,0638									
	spez. Fahrzeugwiderstand		$w_f$ [N/kN]	3,0600	3,0600	8,2400	8,2400	8,2400	8,2400	8,2400	8,2400	8,2400	8,2400									
	spez. Beschleunigungswiderstand		$w_a$ [N/kN]	56,0652	56,0652	56,0652	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000									
	spez. Widerstand		$w$ [N/kN]	63,1891	65,1891	66,3691	8,3038	7,3038	9,3038	10,3038	9,3038	8,3038	9,3038									
	spezifischer Energiebedarf	spez. Energiebedarf Beharrungsfahrt	$e_b$ [Wh/tkm]	19,4124	24,8624	28,0779	22,6279	19,9029	25,3529	28,0779	25,3529	22,6279	25,3529									
		spez. Energiebedarf Beschleunigung	$e_{bs}$ [Wh/tkm]	152,5392	0,0000	152,5392	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000									
		spez. Energiebedarf Nebenverbraucher	$e_{bn}$ [Wh/tkm]	10,3171	1,4917	10,8370	1,3577	1,1942	1,5212	1,6847	1,5212	1,3577	1,5212									
		spez. Energiebedarf Heizung/Klimatisierung	$e_{sh}$ [Wh/tkm]	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000									
		spez. Gesamtenergiebedarf am Stromabnehmer	$e_{sa}$ [Wh/tkm]	229,2566	36,5698	240,6084	33,6426	30,0728	37,2123	40,7821	37,2123	33,6426	37,2123									
	Energiebedarf	spez. Gesamtenergiebedarf ab Unterwerk	$e_{uw}$ [Wh/tkm]	236,3471	37,7008	248,0499	34,6831	31,0029	38,3632	42,0434	38,3632	34,6831	38,3632									
		Energiebedarf Beschleunigung		99,79	0,00	266,79	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00									
		Energiebedarf Beharrung		78,73	117,10	83,14	106,58	93,74	119,41	132,25	119,41	106,58	119,41									
		Energiebedarf Nebenverbraucher & Heizung		21,55	20,69	26,27	20,19	19,57	20,80	21,42	20,80	20,19	20,80									
		Energiebedarf Gesamt		200,07	137,79	376,20	126,77	113,31	140,22	153,67	140,22	126,77	140,22									
		Summe Rückspeisung (10 %)		20,01	13,78	37,62	12,68	11,33	14,02	15,37	14,02	12,68	14,02									
		Energiebedarf inkl. mit Ø-Rückspeisung (10 %)		180,06	124,02	338,58	114,09	101,98	126,19	138,30	126,19	114,09	126,19									
														kWh	Wh/Tkm							
														1.655,22	43,93							
	SPNV	Kennwerte	max. Abschnittsgeschwindigkeit	$v_{max}$ [km/h]	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120								
Geschwindigkeitsdelta			$\Delta v$ [km/h]	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120									
Bruttogewicht des Zuges			$m_{Br}$ [t]	214	214	214	214	214	214	214	214	214	214									
Beschleunigung des Zuges			$a$ [m/s <sup>2</sup> ]	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5									
Beschleunigungsdauer			$t$ [s]	66,67	66,67	66,67	66,67	66,67	66,67	66,67	66,67	66,67	66,67									
Beschleunigungsweg			$l_a$ [km]	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1									
Massenfaktor			$\xi$ [1]	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1									
Wirkungsgrad Fahrmotor			$\eta_{Fz}$ [%]	80,0%	80,0%	80,0%	80,0%	80,0%	80,0%	80,0%	80,0%	80,0%	80,0%									
Wirkungsgrad Fahrleitung			$\eta_{Fl}$ [%]	97,0%	97,0%	97,0%	97,0%	97,0%	97,0%	97,0%	97,0%	97,0%	97,0%									
Widerstände			spez. Neigungswiderstand	$w_i$ [%]	3,0000	5,0000	1,0000	-1,0000	-2,0000	0,0000	1,0000	0,0000	-1,0000	0,0000								
		spez. Bogenwiderstand	$w_b$ [%]	1,0638	1,0638	1,0638	1,0638	1,0638	1,0638	1,0638	1,0638	1,0638	1,0638									
		spez. Fahrzeugwiderstand	$w_f$ [N/kN]	4,1300	4,1300	4,1300	4,1300	4,1300	4,1300	4,1300	4,1300	4,1300	4,1300									
		spez. Beschleunigungswiderstand	$w_a$ [N/kN]	56,0652	56,0652	56,0652	56,0652	56,0652	56,0652	56,0652	56,0652	56,0652	56,0652									
		spez. Widerstand	$w$ [N/kN]	64,2591	66,2591	62,2591	60,2591	59,2591	61,2591	62,2591	61,2591	60,2591	61,2591									
spezifischer Energiebedarf		spez. Energiebedarf Beharrungsfahrt	$e_b$ [Wh/tkm]	22,3282	27,7782	16,8782	11,4282	8,7032	14,1532	16,8782	14,1532	11,4282	14,1532									
		spez. Energiebedarf Beschleunigung	$e_{bs}$ [Wh/tkm]	152,5392	152,5392	152,5392	152,5392	152,5392	152,5392	152,5392	152,5392	152,5392	152,5392									
		spez. Energiebedarf Nebenverbraucher	$e_{bn}$ [Wh/tkm]	10,4920	10,8190	10,1650	9,8380	9,6745	10,0015	10,1650	10,0015	9,8380	10,0015									
		spez. Energiebedarf Heizung/Klimatisierung	$e_{sh}$ [Wh/tkm]	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000									
		spez. Gesamtenergiebedarf am Stromabnehmer	$e_{sa}$ [Wh/tkm]	233,0763	240,2158	225,9368	218,7973	215,2275	222,3670	225,9368	222,3670	218,7973	222,3670									
Energiebedarf		spez. Gesamtenergiebedarf ab Unterwerk	$e_{uw}$ [Wh/tkm]	240,2848	247,6451	232,9245	225,5642	221,8840	229,2444	232,9245	229,2444	225,5642	229,2444									
		Energiebedarf Beschleunigung		45,34	45,34	45,34	45,34	45,34	45,34	45,34	45,34	45,34	45,34									
		Energiebedarf Beharrung		41,15	51,19	31,10	21,06	16,04	26,08	31,10	26,08	21,06	26,08									
		Energiebedarf Nebenverbraucher & Heizung		10,05	10,53	9,57	9,08	8,84	9,33	9,57	9,33	9,08	9,33									
		Energiebedarf Stromabnehmer		96,53	107,06	86,01	75,48	70,22	80,74	86,01	80,74	75,48	80,74									
		Summe Rückspeisung (13 %)		12,55	13,92	11,18	9,81	9,13	10,50	11,18	10,50	9,81	10,50									
		Energiebedarf Stromabnehmer inkl. mit Ø-Rückspeisung (13 %)		83,98	93,14	74,83	65,67	61,09	70,25	74,83	70,25	65,67	70,25									
														kWh	Wh/Tkm							
														839,02	49,01							
SGV		Kennwerte	max. Abschnittsgeschwindigkeit	$v_{max}$ [km/h]	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100								
	Geschwindigkeitsdelta		$\Delta v$ [km/h]	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0									
	Bruttogewicht des Zuges		$m_{Br}$ [t]	1.600	1.600	1.600	1.600	1.600	1.600	1.600	1.600	1.600	1.600									
	Beschleunigung des Zuges		$a$ [m/s <sup>2</sup> ]	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15									
	Beschleunigungsdauer		$t$ [s]	185,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00									
	Beschleunigungsweg		$l_a$ [km]	2,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0									
	Massenfaktor		$\xi$ [1]	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06									
	Wirkungsgrad Fahrmotor		$\eta_{Fz}$ [%]	82,5%	82,5%	82,5%	82,5%	82,5%	82,5%	82,5%	82,5%	82,5%	82,5%									
	Wirkungsgrad Fahrleitung		$\eta_{Fl}$ [%]	97,0%	97,0%	97,0%	97,0%	97,0%	97,0%	97,0%	97,0%	97,0%	97,0%									
	Widerstände		spez. Neigungswiderstand	$w_i$ [%]	3,0000	5,0000	1,0000	-1,0000	-2,0000	0,0000	1,0000	0,0000	-1,0000	0,0000								
		spez. Bogenwiderstand	$w_b$ [%]	1,0638	1,0638	1,0638	1,0638	1,0638	1,0638	1,0638	1,0638	1,0638	1,0638									
		spez. Fahrzeugwiderstand	$w_f$ [N/kN]	7,4200	7,4200	7,4200	7,4200	7,4200	7,4200	7,4200	7,4200	7,4200	7,4200									
		spez. Beschleunigungswiderstand	$w_a$ [N/kN]	16,2080	16,2080	16,2080	16,2080	16,2080	16,2080	16,2080	16,2080	16,2080	16,2080									
		spez. Widerstand	$w$ [N/kN]	27,6918	29,6918	25,6918	23,6918	22,6918	24,6918	25,6918	24,6918	23,6918	24,6918									
	spezifischer Energiebedarf	spez. Energiebedarf Beharrungsfahrt	$e_b$ [Wh/tkm]	31,2934	36,7434	25,8434	20,3934	17,6684	23,1184	25,8434	23,1184	20,3934	23,1184									
		spez. Energiebedarf Beschleunigung	$e_{bs}$ [Wh/tkm]	44,0977	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000									
		spez. Energiebedarf Nebenverbraucher	$e_{bn}$ [Wh/tkm]	4,5235	2,2046	1,5506	1,2236	1,0601	1,3871	1,5506	1,3871	1,2236	1,3871									
		spez. Energiebedarf Heizung/Klimatisierung	$e_{sh}$ [Wh/tkm]	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000									
		spez. Gesamtenergiebedarf am Stromabnehmer	$e_{sa}$ [Wh/tkm]	95,9067	46,7421	32,8760	25,9429	22,4764	29,4095	32,8760	29,4095	25,9429	29,4095									
	Energiebedarf	spez. Gesamtenergiebedarf ab Unterwerk	$e_{uw}$ [Wh/tkm]	98,8728	48,1877	33,8928	26,7453	23,1715	30,3190	33,8928	30,3190	26,7453	30,3190									
		Energiebedarf Beschleunigung		219,97	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00									
		Energiebedarf Beharrung		329,43	570,08	400,96	316,41	274,13	358,69	400,96	358,69	316,41	358,69									
		Energiebedarf Nebenverbraucher & Heizung		27,19	28,22	19,85	15,66	13,57	17,75	19,85	17,75	15,66	17,75									
		Energiebedarf Stromabnehmer		576,59	598,30	420,81	332,07	287,70	376,44	420,81	376,44	332,07	376,44									
		Summe Rückspeisung (5 %)		28,83	29,91	21,04	16,60	14,38	18,82	21,04	18,82	16										

## Anhang 5: Strukturierung der verschiedenen Lösungsräume



Quelle: Eigene Darstellung



Anhang 6: Engpassliste Kanten (zweigleisig)

lfd. Nr.	Streckennr.	Streckenabschnitt	Länge [km]	Gleise	elektrifiziert	Betriebsprogramm	Art des Engpasses	für überlastet erklärt	Ausbauplanung BVWP 2003	Quelle
1	1120	Hamburg-Wandsbek - Ahrensburg	14,4	2	ja	2	Überlastung Kante		3. Gleis	BVWP
8	1700	Wunstorf - Minden	44,1	2	ja	1	Überlastung Kante		3. + 4. Gleis Wunstorf - Minden	BVWP, UBA
10	2270	Grenze D/NL - Oberhausen	72,6	2	ja	1	Überlastung Kante		3. Gleis + Kapazitätssteigerung	BVWP, IEB
13	3600	Gelnhausen - Fulda	66,7	2	ja	1	Überlastung Kante	ja	NBS auf alternativer Streckenführung bis Mottgers	BVWP, IEB, BVU, SNB
15	3600	Bad Hersfeld - Bebra	13,4	2	ja	2			3. + 4. Gleis	BVWP
16	3601	Darmstadt - Mannheim-Friedrichsfeld	50,8	2	ja	1	Überlastung Kante		NBS auf alternativer Streckenführung	BVWP, IEB, BVU
17	4010	Frankfurt-Sportfeld - Mannheim	74	2	ja	1	Überlastung Kante		NBS auf alternativer Streckenführung	BVWP, IEB, BVU
18	5503	Mering - Olching	27,1	2	ja	1	Überlastung Kante		3. + 4. Gleis	BVWP
19	4000	Offenburg - Freiburg - Basel	93	2	ja	1	Überlastung Kante	ja	3. + 4. Gleis	BVWP, UBA, IEB, SNB
20	5903 / 5050 / 6362	Nürnberg - Marktredwitz - Reichenbach	239	2	teil	3			Elektrifizierung	BVWP
22	5600	München Ost - Markt Schwaben	18,2	2	ja	2	Überlastung Kante		3. + 4. Gleis	BVWP, BVU
24	5302	Neu-Ulm - Neuoffingen	28	2	ja	1	Überlastung Kante		3. Gleis	BVWP
26	1220	Pinneberg - Elmshorn	14,7	2	ja	2	Überlastung Kante		3. Gleis	BVWP
29	4020	Graben-Neudorf - Karlsruhe	21	2	ja	1	Überlastung Kante		3. + 4. Gleis	BVWP
33	2550	Hagen - Köln-Mülheim	68	2	ja	1	Überlastung Kante		nicht enthalten	UBA, BVU
35	2630	Köln-West - Bad Godesberg	38	2	ja	2	Überlastung Kante		nicht enthalten	BVU
36	2324	Bonn-Beuel Neuwied	45,5	2	ja	3	Überlastung Kante		nicht enthalten	BVU
37	3900	Gießen - Friedberg	33,5	2	ja	2	Überlastung Kante		nicht enthalten	BVU
38	3510	Gau-Algesheim - Mainz	20,2	2	ja	2	Überlastung Kante		nicht enthalten	BVU
39	4020	Karlsruhe - Hockenheim	40,2	2	ja	1	Überlastung Kante		nicht enthalten	BVU
40	5510 / 5702	München - Rosenheim - Kieferselden	97	2	ja	2	Überlastung Kante		nicht enthalten	BVU
43	5910	Fürth - Würzburg	94,6	2	ja	2	Überlastung Kante	ja	nicht enthalten	SNB
44	5200	Würzburg - Gemünden	37,8	2	ja	2	Überlastung Kante	ja	nicht enthalten	SNB
45	1720	Lüneburg - Uelzen	35	2	ja	1	Überlastung Kante	ja	nicht enthalten	SNB

Quelle: Eigene Darstellung

Anhang 7: Engpassliste Kanten (eingleisig)

lfd. Nr.	Streckennr.	Streckenabschnitt	Länge [km]	Gleise	elektrifiziert	Durschnittl. Abstand Kreuzungsstellen [km]	Betriebsprogramm	Art des Engpasses	Ausbauplanung BVWP 2003	Quelle
2	1043	Neumünster - Bad Oldesloe	44,9	1	nein	15	4		2. Gleis + Elektrifizierung	BVWP
3	1960	Langwedel - Uelzen	97,4	1	nein	19,5	5	Alternative SGV	Elektrifizierung	BVWP, BVU
4	1745	Verden (Aller) - Rotenburg (Wümme)	27,1	1	ja	5,5	5	Alternative SGV	2. Gleis	BVWP
5	1741	Nienburg (Weser) - Minden (Westf)	52	1	ja	7,5	5	Alternative SGV	2. Gleis	BVWP
9	6107	Oebisfelde - Stendal - Wustermark	141	1	nein	10	4		2. Gleis + Elektrifizierung	BVWP
11	6207	Knappenrode - Horka - Grenze D/PL	53	1	nein	26,5	5	Alternative SGV	2. Gleis + Elektrifizierung	BVWP, IEB
14	3810	Niederaula - Bad Hersfeld	11,4	1	nein	11,4	4		2. Gleis	BVWP
21	2510	Kaldenkirchen - Dülken	12,6	1	ja	4,2	5		2. Gleis	BVWP
23	2000	Münster - Lünen	42,1	1	ja	7	5	Alternative SGV	2. Gleis	BVWP, BVU
25	6142	Lübbenau - Cottbus	29,6	1	ja	14,8	5		2. Gleis	BVWP
27	1520	Oldenburg - Leer	55	1	ja	7,5	5	Alternative SGV	2. Gleis	BVWP
28	1122	Lübeck - Bad Kleinen	59,3	1	nein	7,5	4	Alternative SGV	Elektrifizierung	BVWP
30	5600	Markt Schwaben - Freilassing	110	1	nein	8,5	5		2. Gleis + Elektrifizierung	BVWP
31	1820	Löhne - Elze	82	1	nein	11,8	4	Alternative SGV	2. Gleis + Elektrifizierung	BVWP
32	1956	Weddel - Wolfsburg	21	1	ja	10,5	5	Überlastung Kante	2. Gleis	BVWP
34	2980	Lage - Detmold	8,5	1	ja	8,5	5	Überlastung Kante	nicht enthalten	BVU
41	5360	Buchloe - Türkheim	8,3	1	nein	8,3	5	Überlastung Kante	nicht enthalten	BVU
42	4600	Spaichingen - Tuttlingen	14,6	1	ja	4,8	5	Überlastung Kante	nicht enthalten	BVU

Quelle: Eigene Darstellung

## Anhang 8: Engpassliste Kanten (Sonderfälle)

lfd. Nr.	Streckennr.	Streckenabschnitt	Länge [km]	Gleise	elektrifiziert	Durchschnittl. Abstand Kreuzungsstellen [km]	Betriebsprogramm	Art des Engpasses	für überlastet erklärt	Ausbauplanung BVWP 2003	Quelle
12	3600	Hanau - Gelnhausen	44,3	3	ja		1	Überlastung Kante		4. Gleis	BVWP, IEB
7	1700	Seelze - Wunstorf	11,4	4	ja		1	Überlastung Kante	5. + 6. Gleis	Seelze - Wunstorf	BVWP
6	6899	Uelzen - Stendal	107,5	1/2	ja	15,5	5			2.Gleis	BVWP

Quelle: Eigene Darstellung



## Anhang 9: La-Stellen Übersicht

Übersicht La-Stellen											
lfd. Nr.	Strecke	Richtung	von km	bis km	Länge [m]	v IST [km/h]	v La [km/h]	v Diff.	Grund	seit	Kategorie
1	1900	1	15,100	15,700	600	120	70	50	Untergrundmangel	08.08.13	ausgewiesene La-Stelle
2	2013	1	44,930	45,030	100	50	20	30	Sonstiges	02.07.12	ausgewiesene La-Stelle
3	2013	2	44,440	44,540	100	60	20	40	Sonstiges	02.07.12	ausgewiesene La-Stelle
4	2600	2	44,400	44,600	200	160	70	90	Untergrundmangel	23.01.15	ausgewiesene La-Stelle
5	2854	1	19,800	19,900	100	60	20	40	Mangel an Böschung	05.06.13	ausgewiesene La-Stelle
6	2854	2	19,800	19,900	100	60	20	40	Mangel an Böschung	05.06.13	ausgewiesene La-Stelle
7	2864	1	8,700	8,800	100	60	20	40	Sonstiges	21.08.08	ausgewiesene La-Stelle
8	2864	2	8,700	8,800	100	50	20	30	Sonstiges	21.08.08	ausgewiesene La-Stelle
9	2870	1	2,687	2,865	178	60	40	20	eingeschränkte Sicht	10.11.14	ausgewiesene La-Stelle
10	3302	1	9,300	9,415	115	60	20	40	eingeschränkte Sicht	18.12.14	ausgewiesene La-Stelle
11	3302	1	11,782	11,930	148	30	20	10	eingeschränkte Sicht	05.11.14	ausgewiesene La-Stelle
12	3302	1	9,415	9,550	135	60	20	40	eingeschränkte Sicht	18.12.14	ausgewiesene La-Stelle
13	3653	1	12,600	12,800	200	70	10	60	Schleppkurve	05.01.15	ausgewiesene La-Stelle
14	3653	2	12,600	12,800	200	60	10	50	Schleppkurve	05.01.15	ausgewiesene La-Stelle
15	4262	1	10,400	10,500	100	80	20	60	Schleppkurve	10.06.13	ausgewiesene La-Stelle
16	4262	2	10,400	10,500	100	80	20	60	Schleppkurve	10.06.13	ausgewiesene La-Stelle
17	4311	1	5,200	5,300	100	80	20	60	Schleppkurve	21.03.05	ausgewiesene La-Stelle
18	4311	2	5,200	5,300	100	80	20	60	Schleppkurve	21.03.05	ausgewiesene La-Stelle
19	4550	1	8,800	9,100	300	100	40	60	Reisendensicherung	09.07.12	ausgewiesene La-Stelle
20	4550	2	8,800	9,100	300	100	40	60	Reisendensicherung	09.07.12	ausgewiesene La-Stelle
21	5051	1	65,365	65,883	518	100	80	20	LST	21.10.11	ausgewiesene La-Stelle
22	5104	1	7,350	7,450	100	60	40	20	eingeschränkte Sicht	13.09.13	ausgewiesene La-Stelle
23	5250	1	11,900	12,600	700	60	20	40	Sonstiges	16.03.12	ausgewiesene La-Stelle
24	5250	1	11,900	12,600	700	60	20	40	Sonstiges	16.03.12	ausgewiesene La-Stelle
25	5386	1	1,300	1,400	100	30	20	10	Sonstiges	28.01.11	ausgewiesene La-Stelle
26	5386	2	1,300	1,400	100	30	20	10	Sonstiges	28.01.11	ausgewiesene La-Stelle
27	5400	1	52,100	52,200	100	140	70	70	Sonstiges	01.08.13	ausgewiesene La-Stelle
28	5400	2	52,100	52,200	100	140	70	70	Sonstiges	01.08.13	ausgewiesene La-Stelle
29	5451	2	16,200	16,300	100	40	20	20	eingeschränkte Sicht	20.06.11	ausgewiesene La-Stelle
30	5453	1	21,200	21,300	100	100	50	50	Brückenmangel	24.04.13	ausgewiesene La-Stelle
31	5453	2	21,200	21,300	100	100	50	50	Brückenmangel	24.04.13	ausgewiesene La-Stelle
32	5453	1	30,800	30,900	100	80	40	40	Brückenmangel	30.04.10	ausgewiesene La-Stelle
33	5453	2	30,800	30,900	100	80	40	40	Brückenmangel	30.04.10	ausgewiesene La-Stelle
34	5504	1	101,410	101,510	100	60	30	30	Schleppkurve	03.08.07	ausgewiesene La-Stelle
35	5504	2	101,410	101,510	100	60	30	30	Schleppkurve	03.08.07	ausgewiesene La-Stelle
36	5504	1	119,100	119,200	100	80	20	60	LST	01.12.05	ausgewiesene La-Stelle
37	5504	2	119,100	119,200	100	40	20	20	LST	01.12.05	ausgewiesene La-Stelle
38	5504	1	119,200	119,600	400	80	40	40	eingeschränkte Sicht	26.04.13	ausgewiesene La-Stelle
39	5621	1	1,600	1,750	150	60	40	20	Mangel an Böschung	10.10.14	ausgewiesene La-Stelle
40	5621	2	1,600	1,750	150	60	40	20	Mangel an Böschung	10.10.14	ausgewiesene La-Stelle
41	5621	1	9,600	9,700	100	40	20	20	eingeschränkte Sicht	26.02.13	ausgewiesene La-Stelle
42	5621	1	14,300	14,400	100	60	20	40	eingeschränkte Sicht	19.05.08	ausgewiesene La-Stelle
43	5621	2	4,800	4,900	100	60	20	40	eingeschränkte Sicht	01.10.10	ausgewiesene La-Stelle
44	5622	1	19,500	19,600	100	100	30	70	Sonstiges	10.12.07	ausgewiesene La-Stelle
45	5622	2	19,500	19,600	100	100	30	70	Sonstiges	10.12.07	ausgewiesene La-Stelle
46	5734	1	9,685	9,805	120	50	20	30	Schleppkurve	06.09.13	ausgewiesene La-Stelle
47	5734	2	9,685	9,805	120	50	20	30	Schleppkurve	06.09.13	ausgewiesene La-Stelle
48	5812	1	4,200	4,300	100	80	20	60	Behördliche Anordnung	03.05.13	ausgewiesene La-Stelle
49	5812	2	4,200	4,300	100	60	20	40	Behördliche Anordnung	03.05.13	ausgewiesene La-Stelle
50	5911	2	3,200	3,300	100	50	20	30	Schleppkurve	12.05.11	ausgewiesene La-Stelle
51	5914	2	9,200	9,300	100	60	10	50	eingeschränkte Sicht	10.02.12	ausgewiesene La-Stelle
52	6264	1	19,900	20,000	100	80	50	30	Brückenmangel	29.08.14	ausgewiesene La-Stelle
53	6264	2	20,000	20,100	100	80	50	30	Brückenmangel	29.08.14	ausgewiesene La-Stelle
54	6619	1	26,200	27,000	800	60	40	20	Brückenmangel	07.03.14	ausgewiesene La-Stelle
55	6619	2	26,200	27,000	800	60	40	20	Brückenmangel	07.03.14	ausgewiesene La-Stelle
56	6645	2	32,000	32,100	100	60	20	40	LST	12.10.12	ausgewiesene La-Stelle
57	6311	1	21,700	21,900	200	100	10	90	Oberbaumangel	01.12.14	ausgewiesene La-Stelle
58	6311	2	21,700	21,900	200	100	10	90	Oberbaumangel	01.12.14	ausgewiesene La-Stelle
59	6389	1	18,440	20,400	1.960	50	20	30	Oberbaumangel	07.08.14	ausgewiesene La-Stelle
60	6389	2	18,440	20,400	1.960	50	20	30	Oberbaumangel	07.08.14	ausgewiesene La-Stelle
61	6409	1	17,600	17,700	100	100	70	30	Oberbaumangel	07.01.15	ausgewiesene La-Stelle
62	6409	2	17,600	17,700	100	100	70	30	Oberbaumangel	07.01.15	ausgewiesene La-Stelle
63	6722	1	-0,540	0,054	594	40	20	20	Oberbaumangel	05.05.08	ausgewiesene La-Stelle
64	6722	2	-0,540	0,054	594	40	20	20	Oberbaumangel	05.05.08	ausgewiesene La-Stelle
65	6855	1	-0,500	0,000	500	60	10	50	Oberbaumangel	24.06.10	ausgewiesene La-Stelle
66	6855	2	-0,500	0,000	500	60	10	50	Oberbaumangel	24.06.10	ausgewiesene La-Stelle
67	6411		40,000	41,200	1.200	120	70	50	Schaden Hochwasser 2013	05.06.13	in JF 2014 übernommen
68	6411		40,000	41,200	1.200	120	70	50	Schaden Hochwasser 2013	05.06.13	in JF 2014 übernommen
69	6935		26,100	26,200	100	30	10	20	Sonstiges	19.08.13	in JF 2014 übernommen
70	2600		72,700	77,000	4.300	120	100	20	LST	18.06.08	in JF 2014 übernommen
71	2600		72,800	77,000	4.200	120	100	20	LST	18.06.08	in JF 2014 übernommen
72	5453		26,415	27,190	775	100	40	60	Reisendensicherung	11.11.13	in JF 2014 übernommen
73	5453		34,746	35,583	837	50	40	10	Reisendensicherung	11.11.13	in JF 2014 übernommen
74	5903		42,900	43,000	100	100	90	10	Brückenmangel	29.11.13	in JF 2014 übernommen
75	5903		43,000	43,500	500	100	90	10	Brückenmangel	29.11.13	in JF 2014 übernommen
76	5903		43,500	44,000	500	110	90	20	Brückenmangel	29.11.13	in JF 2014 übernommen
77	5903		44,000	47,700	3.700	120	90	30	Brückenmangel	29.11.13	in JF 2014 übernommen
78	5903		47,700	48,200	500	100	90	10	Brückenmangel	29.11.13	in JF 2014 übernommen
79	2013		44,900	45,000	100	60	20	40	LST	02.07.12	in JF 2014 übernommen
80	2013		44,400	44,500	100	60	20	40	LST	02.07.212	in JF 2014 übernommen

Quelle: Eigene Darstellung

### Anhang 10: Kategorisierung Infrastrukturmaßnahmen

Ifd. Nr.	Problem-kategorie	Problem-beschreibung	Lösungs-möglichkeiten	Stichwort
01	eingleisige Strecke	fehlende Kreuzungsmöglichkeiten -> geringe betriebliche Flexibilität	Schaffung von Kreuzungsmöglichkeiten	Ausbau
02	eingleisige Strecke	Standkreuzungen	Herstellen eines zweigleisigen Begegnungsschnittes	Ausbau
03	eingleisige Strecke	mangelnde Leistungsfähigkeit -> kaum Entlastungsfunktion	zweigleisiger Ausbau	Ausbau
04	Kapazität	Behinderungen im SPV und SGV aufgrund eingeschränkter Streckenleistungsfähigkeit	zweigleisiger Ausbau	Neubau
05	Kapazität	steigen Auslastung durch Seehafenhinterland-verkehre	dreigleisiger Ausbau	Ausbau
06	Kapazität	zweigleisiger Engpass in einer sonst viergleisig ausgebauten Strecke	viergleisiger Ausbau des Engpasses	Ausbau
07	Kapazität	mangelnde Streckenleistungsfähigkeit durch Mischbetrieb	fünfgleisiger Ausbau	Ausbau
08	Kapazität	mangelnde Streckenleistungsfähigkeit durch Mischbetrieb	sechsgleisiger Ausbau	Ausbau
09	Kapazität	Überlastung eines Knotens (z.B. Hamburg)	Trennung der Nahverkehre durch Bau von separaten S-Bahngleisen	Entmischung
10	Kapazität	eingeschränkte Fahrmöglichkeiten im Bhf.	Einbau neuer Weichenverbindungen	Weichen
11	Kapazität	Kapazitätseinschränkung durch Geschwindigkeitsreduzierung infolge eines Gleiswechsels	Einbau schlanker Weichenverbindungen für schnelles Überholen	Weichen
12	Kapazität	höhengleiche Durchfahrung -> Behinderung für den SGV	Bau Überwerfungsbauwerk bzw. Höhenfreier Abzweig	Überwerfungsbauwerk
13	Kapazität	Kapazitätsengpässe	Blockverdichtung	LST
14	Kapazität	keine ausreichenden Überholmöglichkeiten	Verlängerung von Überholgleisen	Ausbau

lfd. Nr.	Problem-kategorie	Problem-beschreibung	Lösungs-möglichkeiten	Stichwort
15	Kapazität	Behinderung von SPFV und SPNV	Einrichten von Überleitstellen zw. SPNV und SPFV	Ausbau
16	Knoten	Behinderung durch Kopf machen im Bhf.	Bauen einer eingleisigen Verbindungskurven	Neubau
17	Knoten		Bauen einer zweigleisigen Verbindungskurven	Neubau/ Ausbau
18	Knoten		Erhöhung der Einfahrgeschwindigkeit	Ertüchtigung
19	Knoten	Züge können nicht beginnen, enden oder wenden	Umbau eines Haltepunktes zu einem Bahnhof	Ausbau
20	Knoten	schwierige betriebliche Situation	Bau eines Durchgangsbahnhofes	Neubau
21	Knoten	Rangierbahnhof überlastet	Neubau Puffergleise	Neubau/ Ausbau
22	Mangel	Lastbeschränkung einer Brücke	Ertüchtigung oder Erneuerung der Brücke	Ertüchtigung/ Erneuerung
23	Mangel	veraltete LST, teilweise techn. nicht gesicherte BÜs	Ertüchtigung für konstante Geschwindigkeit	Ertüchtigung/ Erneuerung
24	Mangel	Reduzierung der Geschwindigkeit infolge eines Oberbaumangels	Beseitigung Oberbaumangel	Ertüchtigung/ Erneuerung
25	Mangel	Reduzierung der Geschwindigkeit infolge eines Untergrundmangels	Beseitigung Untergrundmangel	Ertüchtigung/ Erneuerung
26	Sonstiges		Erhöhung der Streckengeschwindigkeit auf 100/120/160 km/h	Ausbau
27	Sonstiges		Linienverbesserung von Strecken	Neubau/ Ausbau
28	Sonstiges		Reaktivierung von Strecken	Ertüchtigung
29	beispielhafter Spezialfall	IC muss im Bhf. auf das Überholgleis -> Verringerung der Geschwindigkeit von 160 auf 80 km/h	Bau eines Bahnsteiges am Überholgleis, damit der IC durchfahren kann	Neubau

Quelle: Eigene Darstellung

### Anhang 11: La-Stellen Energiemehrbedarfsrechnung

Sie finden diesen Anhang als Exceltabelle unter der Bezeichnung:

*Anhänge\Anhang\_11\_La-Stellen\_Energiemehrbedarfsrechnung.xlsx*

### Anhang 12: Berechnungstool Infrastrukturkosten

Sie finden diesen Anhang als Exceltabelle unter der Bezeichnung:

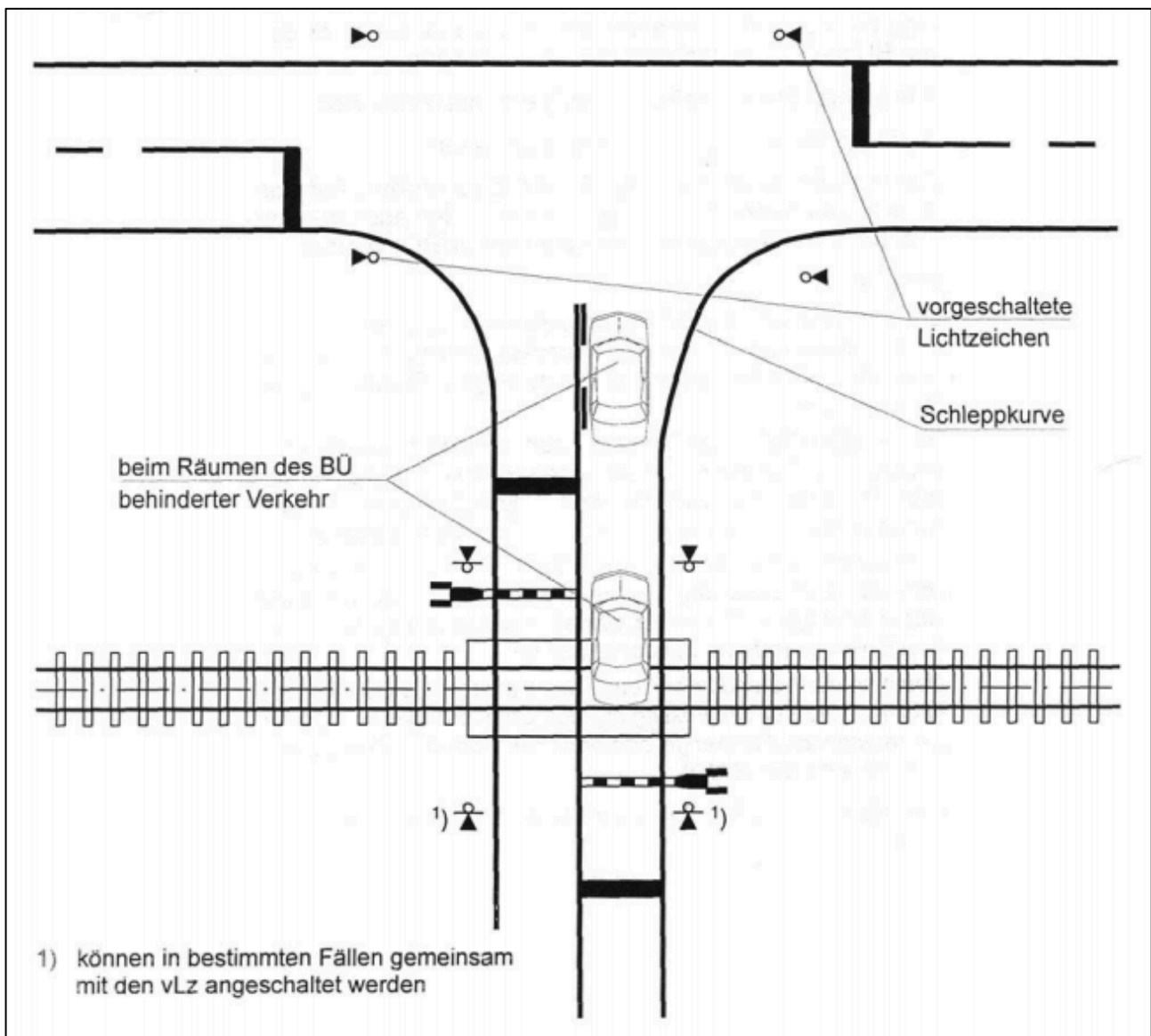
*Anhänge\Anhang\_12\_Berechnungstool\_Infrastruktur.xlsx*

### Anhang 13: La-Stellen Kostenrechner Maßnahmen

Sie finden diesen Anhang als Exceltabelle unter der Bezeichnung:

*Anhänge\Anhang\_13\_La-Stellen\_Kostenrechner\_Maßnahmen.xlsx*

### Anhang 14: Bsp. für das Anordnen vorgeschalteter Lichtzeichen



Quelle: DB Netz 815.0032 2008, Abschnitt 3 (6)

### **Anhang 15: Knoten Energiemehrbedarfsrechnung<sup>142</sup>**

Sie finden diesen Anhang als Exceltabelle unter der Bezeichnung:

*Anhänge\Anhang\_15\_Knoten\_Energiemehrbedarfsrechnung.xlsx*

### **Anhang 16: OpenTrack-Simulationsdaten**

Sie finden diesen Anhang als Zip-Datei unter der Bezeichnung:

*Anhänge\Anhang\_16\_OpenTrack\_Simulationsdaten.zip*

---

<sup>142</sup> Die Tabellen für Kanten und eingleisige Strecken sind vom Aufbau her identisch und werden daher nicht separat angehängt.